

**STUDI METODE *AUTOFLUSH*:  
PENGENDALIAN *SCALING* PADA SISTEM  
MEMBRAN *REVERSE OSMOSIS* SKALA  
RUMAH TANGGA**



**TESIS**

**Untuk memenuhi sebagian persyaratan  
mencapai derajat Sarjana S-2**

**Magister Teknik Kimia**

**DESSY ARIYANTI**

**NIM: L4C 007 001**

**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS DIPONEGORO  
SEMARANG**

**2009**

**TESIS**  
**STUDI METODE *AUTOFLUSH*:**  
**PENGENDALIAN *SCALING* PADA SISTEM MEMBRAN**  
***REVERSE OSMOSIS* SKALA RUMAH TANGGA**

disusun oleh:

**DESSY ARIYANTI**

**NIM: L4C 007 001**

telah dipertahankan di depan penguji

pada tanggal 16 April 2009

dan dinyatakan telah lulus memenuhi syarat untuk diterima

**Pembimbing 1,**

**(Dr. I Nyoman Widiasta, ST., MT.)**

**Menyetujui,  
Pembimbing 2,**

**(Ir. Diah Susetyo R., MT.)**

**Ketua Program Studi  
Magister Teknik Kimia,**

**(Prof. Dr. Ir. Bambang Pramudono, MS.)**

## KATA PENGANTAR

Tesis dengan judul "Studi Metode *autoflush*: Pengendalian *Scaling* pada Sistem Membran *Reverse osmosis* Skala Rumah Tangga" disusun untuk memenuhi persyaratan penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Kimia Universitas Diponegoro Semarang. Penyajian tesis meliputi latar belakang, tujuan, ruang lingkup, dan manfaat penelitian pada bab 1, tinjauan pustaka dan metode penelitian pada bab 2 dan 3, hasil dan pembahasan pada bab 4, serta kesimpulan dan saran pada bagian akhir.

Tesis ini tidak akan terselesaikan dengan baik tanpa bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terimakasih kepada Bapak Dr. I Nyoman Widiassa, ST., MT. dan Ibu Ir. Diah Susetyo R., MT. selaku pembimbing yang telah memberikan bimbingan secara intensif mulai dari penulisan usulan penelitian, pelaksanaan sampai dengan penulisan tesis ini. Penulis juga menyampaikan terimakasih kepada teman hidup dan keluarga tercinta yaitu Ananta W.P, keluarga Bapak Begeh Karnaya dan keluarga Bapak Wayan Sukarya yang telah memberikan dukungan, hiburan dan doa tanpa batas demi keberhasilan studi serta teman seperjuangan Ibu Eri, Ibu Wikan dan Dodik serta semua pihak yang telah membantu proses penyelesaian penelitian ini.

Tidak ada yang sempurna di dunia, begitu pun dengan tesis ini. Segala yang terbaik telah dilakukan dalam proses penyelesaiannya, namun kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan sehingga karya ini dapat lebih bermanfaat bagi siapapun yang membacanya.

Semarang, April 2009

Penulis

## **PERNYATAAN**

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan di dalamnya tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan lembaga pendidikan lainnya. Pengetahuan yang diperoleh dari hasil penerbitan maupun yang belum/tidak diterbitkan, sumbernya dijelaskan di dalam tulisan dan daftar pustaka.

Semarang, April 2009

(Dessy Ariyanti)

## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	i
Halaman Pengesahan .....	ii
Kata Pengantar .....	iii
Pernyataan.....	iv
Daftar Isi .....	v
Daftar Tabel .....	vii
Daftar Gambar.....	viii
Abstrak .....	xi
Abstract .....	xii
Notasi dan Simbol.....	xiii
BAB I : PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	5
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian .....	6
BAB II : TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Membran <i>Reverse osmosis</i> .....	7
2.1.1 Perkembangan Membran .....	7
2.1.2 Definisi <i>Reverse osmosis</i> .....	8
2.1.3 Tipe dan Konfigurasi Membran <i>Reverse osmosis</i> .....	9
2.1.4 Terminologi dan Deskripsi Proses Membran RO .....	11
2.1.5 Aplikasi Membran RO untuk Skala Rumah Tangga .....	13
2.2 Polarisasi Konsentrasi .....	14
2.3 <i>Scaling</i> pada Membran RO .....	17
2.3.1 Pengertian <i>Scaling</i> .....	17
2.3.2 Mekanisme <i>Scaling</i> $\text{CaCO}_3$ pada Membran RO .....	19
2.3.3 Potensi <i>Scaling</i> pada Umpan .....	22

2.3.4 Faktor-faktor yang Mempengaruhi <i>Scaling</i> .....	24
2.3.5 Metode untuk Mengatasi <i>Scaling</i> .....	25
2.3.6 Metode <i>Autoflush</i> .....	27
BAB III : METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Bahan yang Digunakan .....	30
3.2 Rancangan Penelitian dan Rangkaian Alat .....	30
3.3 Prosedur Penelitian .....	32
3.4 Metode Analisis .....	34
3.5 Interpretasi Data.....	34
BAB IV : HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	
4.1 Pengaruh Nilai LSI terhadap Fluks Permeat pada Sistem Tanpa <i>Autoflush</i> .....	35
4.2 Pengaruh Interval terhadap Fluks Permeat pada Sistem dengan <i>Autoflush</i> .....	38
4.3 Pengaruh Durasi terhadap Fluks Permeat pada Sistem dengan <i>Autoflush</i> .....	45
4.4 Hubungan Interval dengan Nilai LSI Air Umpan.....	47
4.5 Pengaruh dengan dan Tanpa Metode <i>Autoflush</i> terhadap Fluks Permeat .....	50
4.6 Efektifitas <i>Autoflush</i> dalam Aplikasi Membran RO Skala Rumah Tangga.....	51
BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan .....	53
5.2 Saran .....	54
BAB VI: RINGKASAN .....	55
DAFTAR PUSTAKA .....	56
Lampiran 1	
Lampiran 2	

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Beberapa jenis air tanah dan kandungan ion-ion utama .....	2
Tabel 2.1 Jenis membran RO .....	10
Tabel 2.2 Potensi <i>scaling</i> berdasarkan nilai LSI.....	22
Tabel 3.1 Konsentrasi larutan model .....	30
Tabel 3.2 Rancangan Penelitian Sistem Tanpa <i>Autoflush</i> .....	31
Tabel 3.3 Rancangan Penelitian Sistem dengan <i>Autoflush</i> .....	31
Tabel 4.1 Waktu total <i>autoflush</i> selama 6 jam proses .....	48
Tabel 4.2 Kombinasi durasi/interval yang optimum untuk nilai LSI tertentu .....	49

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema perkembangan <i>reverse osmosis</i> .....	7
Gambar 2.2	Skema fenomena osmosis dan <i>reverse osmosis</i> .....	8
Gambar 2.3	Skema tipe membran RO .....	10
Gambar 2.4	Sistem membran RO dan alirannya.....	11
Gambar 2.5	Konsep dasar pemisahan dengan membran dan polarisasi konsentrasi pada kondisi tunak .....	15
Gambar 2.6	Fluks sebagai fungsi dari waktu .....	17
Gambar 2.7	Tipe resistensi pada membran saat perpindahan massa melewati membran dengan <i>driving force</i> tekanan .....	19
Gambar 2.8	Mekanisme <i>scaling</i> pada membran.....	20
Gambar 2.9	Mekanisme <i>scaling</i> .....	21
Gambar 2.10	Mekanisme <i>antiscalant</i> dalam mencegah proses <i>scaling</i> .....	26
Gambar 2.11	Konsep metode <i>autoflush</i> pada operasi membran.....	28
Gambar 3.1	Rangkaian alat.....	32
Gambar 3.2	Diagram alir penelitian.....	33
Gambar 4.1	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO tanpa <i>autoflush</i> dengan nilai LSI bervariasi .....	36
Gambar 4.2	Grafik konsentrasi $\text{Ca}^{2+}$ vs waktu pengamatan pada operasi membran RO tanpa <i>autoflush</i> dengan nilai LSI bervariasi .....	37
Gambar 4.3	Hasil analisa SEM pada permukaan membran setelah operasi membran RO tanpa <i>autoflush</i> .....	37
Gambar 4.4	Hasil analisa EDS pada permukaan membran setelah operasi membran RO tanpa <i>autoflush</i> .....	38



Gambar 4.5	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI 0,8 dengan waktu (durasi) <i>autoflush</i> 15 detik dan variasi interval 5-60 menit .....39
Gambar 4.6	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI 0,8 dengan waktu (durasi) <i>autoflush</i> 30 detik dan variasi interval 5-60 menit .....40
Gambar 4.7	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI 0,8 dengan waktu (durasi) <i>autoflush</i> 60 detik dan variasi interval 5-60 menit .....40
Gambar 4.8	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI 1,2 dengan waktu (durasi) <i>autoflush</i> 15 detik dan variasi interval 5-60 menit .....41
Gambar 4.9	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI 1,2 dengan waktu (durasi) <i>autoflush</i> 30 detik dan variasi interval 5-60 menit .....42
Gambar 4.10	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI 1,2 dengan waktu (durasi) <i>autoflush</i> 60 detik dan variasi interval 5-60 menit .....42
Gambar 4.11	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI 1,5 dengan waktu (durasi) <i>autoflush</i> 15 detik dan variasi interval 5-60 menit .....43
Gambar 4.12	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI 1,5 dengan waktu (durasi) <i>autoflush</i> 30 detik dan variasi interval 5-60 menit .....44
Gambar 4.13	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI 1,5 dengan waktu (durasi) <i>autoflush</i> 60 detik dan variasi interval 5-60 menit .....44

Gambar 4.14	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI 0,8 dengan interval 5 menit dan variasi waktu (durasi) 15-60 detik .....	46
Gambar 4.15	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI 1,2 dengan interval 5 menit dan variasi waktu (durasi) 15-60 detik .....	46
Gambar 4.16	Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI 1,5 dengan interval 5 menit dan variasi waktu (durasi) 15-60 detik .....	47
Gambar 4.17	Grafik % air yang terbuang vs interval <i>autoflush</i> pada durasi 15; 30; dan 60 detik .....	48
Gambar 4.18	Grafik hubungan interval dengan nilai LSI umpan pada sistem membran RO tekanan dan waktu operasi 5 kg/cm <sup>2</sup> .....	49
Gambar 4.19	Grafik pengaruh dengan metode <i>autoflush</i> 15/15 dan tanpa metode <i>autoflush</i> terhadap fluks permeat pada sistem membran RO air umpan LSI = 1,5 .....	50
Gambar 4.0	Grafik efektifitas metode <i>autoflush</i> pada sistem membran RO tekanan dan waktu operasi 5 kg/cm <sup>2</sup> dan 6 jam .....	51

## ABSTRAK

Air adalah salah satu komponen penting yang menunjang kehidupan manusia. Semakin meningkatnya populasi penduduk, terjadi peningkatan konsumsi air bersih. Selain itu, peningkatan standar kehidupan dan aktivitas industri menuntut standar kualitas air bersih yang lebih baik. Akan tetapi, peningkatan kebutuhan tersebut berkebalikan dengan ketersediaan sumber-sumber air. Teknologi membran RO skala rumah tangga telah dikembangkan untuk mengatasi masalah ketersediaan air bersih. Salah satu kelemahan membran RO adalah terjadinya “*scaling*”. *Scaling* merupakan proses terbentuknya lapisan oleh material berupa komponen-komponen anorganik yang tidak diinginkan pada permukaan membran. *Scaling* pada membran RO secara signifikan dapat mengurangi fluks pada permeat (produk), rejeksi garam-garam yang terkandung pada umpan, kerusakan membran dan memperpendek umur membran. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan perilaku penurunan fluks permeat yang terjadi pada membran RO pada nilai LSI yang berbeda. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengamati keefektifan *autoflush* dan menentukan hubungan antara interval dan (waktu) durasi *autoflush* terhadap karakteristik air umpan yaitu nilai *Langelier Saturation Index* (LSI).

Sistem membran RO skala rumah tangga dioperasikan dengan tekanan operasi  $5 \text{ kg/cm}^2$  dan kisaran waktu operasi  $\pm 6$  jam. Mekanisme *scaling*  $\text{CaCO}_3$  yang terjadi pada membran RO dapat diketahui dengan mengamati perilaku penurunan fluks permeat setiap 20 menit pada air umpan yang memiliki karakteristik (nilai LSI) berbeda. Nilai LSI yang digunakan pada penelitian ini adalah 0 s/d 1,5. Sedangkan untuk mengetahui efektifitas dari metode *autoflush* dalam mengendalikan *scaling* dapat dilihat dengan membandingkan fluks permeat saat proses tanpa menggunakan metode *autoflush* dan dengan metode *autoflush*. Parameter *autoflush* yang divariasikan adalah waktu (durasi) (15-60 detik) dan interval (5-60 menit).

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pertama kali terjadi pada air umpan yang memiliki kisaran nilai LSI 0,31-0,8. Hal ini didukung oleh penurunan fluks signifikan (16-31%) pada air umpan yang memiliki nilai LSI 0,8-1,5; dan konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  pada air umpan yang mulai menunjukkan penurunan pada nilai LSI 0,8. Parameter *autoflush* yaitu interval, dapat memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap stabilitas fluks permeat. Persamaan interval (Int) =  $(-10,899 \times \text{LSI}) + 34,132$  dapat digunakan untuk mencari interval optimum yang akan diterapkan pada suatu sistem membran RO tekanan operasi  $5 \text{ kg/cm}^2$ , pada kisaran LSI 0,31-1,5. Waktu (durasi) minimum yang ditetapkan yaitu 15 detik, telah dapat menstabilkan kinerja membran dan penambahan waktu (durasi) menjadi 30 dan 60 detik tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kinerja membran. Secara umum metode *autoflush* dapat digunakan pada sistem membran RO skala rumah tangga sebagai salah satu metode mengendalikan *scaling* dengan mendepolarisasi konsentrasi zat terlarut pada permukaan membran.

## **ABSTRACT**

*Water is very essential to human life. The improvement standard of living from time to time has increasing the water quality standard that needed by human. In contrast, quality of water in every resource in the world was decline due to industrial growth and human activity. Reverse osmosis (RO) membrane is becoming a common home treatment method for contaminated drinking water. RO is probably best known for its use in desalination projects. However, RO membrane has limitation especially once scaling phenomena appear in the system. Scaling defines as precipitation of sparingly soluble salts on membrane surfaces. Scaling can cause permeate flux decline, degradation of salt rejection and permanent damage in membrane which affected membrane performance and membrane life time. The scope of this work is two-fold: first to investigate the trend of flux decline due to scaling in various LSI value with full recycle mode in relatively short runs 6 h. A second objective is to examine the effectiveness of intermittent autoflush method (by varying the interval and duration time) in the same household RO system under identical conditions.*

*All experiments were carried out using commercially available spiral wound RO membrane (CSM RE-1812LP). In the beginning, membrane conditioning was conducted for stabilizing permeate flux in operating condition 6 hours of time; pressure 5 kg/cm<sup>2</sup> and total recycle mode. To investigate the trend of flux decline due to scaling in various LSI value, the system was operated without intermittent autoflush method using feed water in various LSI value 0-1.5. Sample of permeate was taken every 20 min, for flux analysis. The second phase of the experiment conducted using intermittent autoflush method. The system was run in the variation of two autoflush parameters i.e. duration and interval. Duration and interval time of autoflush were in the range of 15 to 60 s and 5 to 60 min respectively. Identical condition and the same analysis method also used in this experiment.*

*The result shown that permeate flux start to decline and Ca<sup>2+</sup> concentration start to decrease significantly in between of feed water with LSI value 0.31-0.8 when system operated without intermittent autoflush. In contrast, permeate flux of the system which operated using intermittent autoflush relatively stable. It is emphasized that intermittent autoflush was able to stabilizing and improving performance of household reverse osmosis systems at some specific level.*

## NOTASI DAN SIMBOL

AF	= kombinasi <i>autoflush</i> (waktu atau durasi (detik))/(interval (menit))
A <sub>M</sub>	= luas permukaan membran
C	= konsentrasi zat terlarut pada <i>boundary layer</i> (g/cm <sup>3</sup> )
C <sub>b</sub>	= konsentrasi zat terlarut pada larutan <i>bulk</i> (g/cm <sup>3</sup> )
C <sub>F</sub>	= konsentrasi zat terlarut pada umpan
C <sub>m</sub>	= konsentrasi zat terlarut pada permukaan membran (g/cm <sup>3</sup> )
CP	= Polarisasi konsentrasi (pers. 2.8)
C <sub>p</sub>	= konsentrasi zat terlarut pada permeat (g/cm <sup>3</sup> )
C <sub>S</sub>	= konsentrasi zat terlarut pada saat jenuh
D	= koefisien difusi zat terlarut dalam air (cm <sup>2</sup> /s)
F <sub>F</sub>	= laju alir umpan
F <sub>P</sub>	= laju alir permeat
I	= <i>ionic strength</i> larutan dalam hal ini adalah air = $2,5 \cdot 10^{-5}$ TDS
Int	= Interval <i>autoflush</i>
J <sub>S</sub>	= fluks netto zat terlarut yang melewati membran (gr/cm <sup>3</sup> .s) (pers. 2.2; 2.7)
J <sub>V</sub>	= fluks permeat (gr/cm <sup>3</sup> .s)
J <sub>W</sub>	= fluks air pada aliran permeat (pers. 2.1)
Ka	= konstanta kesetimbangan karbonat/bikarbonat terhadap waktu = $9,2 \cdot 10^{-13} T + 2,3 \cdot 10^{-11}$
K <sub>sp</sub>	= hasil kali kelarutan sebagai fungsi waktu = $9,237 \cdot 10^{-9} e^{-0,0277T}$
k	= $D/\delta$ , koefisien perpindahan massa yang bergantung pada berat molekul dari komponen
LSI	= <i>Langelier Saturation Index</i> (pers. 2.14)
pH <sub>s</sub>	= pH saat saturasi (pers. 2.15; 2.16; 2.18)
R	= rejeksi membran (pers. 2.3)
R <sub>abs</sub>	= fraksi rejeksi yang teramati (pers. 2.10)

$R_{\text{tot}}$	= resistensi total
$r$	= <i>recovery</i> air (pers. 2.4; 2.5)
SS	= supersaturasi (pers. 2.6)
S&DSI	= <i>Stiff Davis Stability Index</i> (pers. 2.17)
TCF	= Thin Composite Membrane
$Z_i$	= muatan ion
$\Delta P$	= perbedaan tekanan
$\Delta t$	= perbedaan waktu
$\gamma$	= koefisien aktivitas
	$= 10^{\frac{0,5(Z_i)^2 \sqrt{I}}{1+\sqrt{I}}}$
$\eta$	= viskositas
$\mu_w$	= tekanan osmosis air
$\pi$	= tekanan osmosis

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Air merupakan komponen penting dalam kehidupan manusia. Semakin meningkatnya populasi penduduk, terjadi peningkatan konsumsi air minum. Selain itu, peningkatan standar kehidupan dan aktivitas industri menuntut standar kualitas air minum yang lebih baik. Peningkatan kebutuhan tersebut berkebalikan dengan ketersediaan sumber-sumber air [1-3]. Beberapa teknologi telah dikembangkan untuk mengatasi masalah penyediaan dan peningkatan kualitas air minum, salah satunya adalah teknologi pemurnian air menggunakan membran *reverse osmosis* (RO) [3- 5].

Di berbagai belahan dunia, teknologi membran RO secara luas digunakan untuk memproduksi air dengan kualitas tinggi, baik dalam skala besar maupun kecil [4]. Menurut catatan penjualan modul membran RO pada tahun 1998 mencapai 200 juta US dolar [6]. Teknologi membran RO skala rumah tangga merupakan satu perkembangan yang memiliki prospek di masa depan serta memungkinkan masyarakat untuk memiliki sistem pengolahan air sendiri yang praktis dan ekonomis [7].

Membran RO dapat memisahkan air dari komponen-komponen yang tidak diinginkan seperti komponen organik, anorganik, bakteri, virus, partikulat, serta ion atau garam terlarut. Membran RO juga dikenal sebagai media penyaring yang memiliki pori paling kecil dibandingkan media penyaring lainnya, yaitu 0,0001 mikron [5]. Teknologi ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan teknologi pengolahan air konvensional seperti flokulasi, sedimentasi, *ion exchange*, distilasi, serta adsorpsi. Proses pemisahan membran RO dapat dilakukan secara kontinyu tanpa penambahan bahan kimia, energi yang dibutuhkan lebih rendah, mudah *discale up*, dan mudah dikombinasikan dengan proses yang lain [9-11]. Beberapa riset dan paten tentang keefektifan membran

RO dengan berbagai macam desain dan konfigurasi turut mendukung perkembangan teknologi RO skala rumah tangga [12-18].

Perkembangan pesat industri membran RO menuntut perbaikan teknologi ke arah kesempurnaan, yaitu meminimalkan kelemahan-kelemahan yang dapat menurunkan kinerja membran. Salah satu kelemahan membran RO adalah terjadinya “*scaling*” [19, 20]. *Scaling* didefinisikan sebagai proses terbentuknya lapisan oleh komponen-komponen anorganik pada permukaan membran. *Scaling* yang terjadi pada permukaan membran RO dapat mengurangi efisiensi proses yaitu mengurangi fluks pada permeat (produk) dan mengurangi rejeksi garam-garam yang terkandung pada umpan. Selain itu, *scaling* juga dapat menyebabkan kerusakan membran dan akhirnya mengurangi ketahanan serta memperpendek umur membran [19-24].

Secara umum *scaling* biasanya dihubungkan dengan karakteristik air umpan [6]. Sumber-sumber air seperti air sungai, danau, waduk, air tanah, dan air payau, mengandung senyawa anorganik penyebab *scaling*, antara lain  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  dan  $\text{SiO}_2$ . Beberapa jenis air tanah dan komposisi kimianya dapat dilihat pada Tabel 1.1 [1].

Tabel 1.1. Jenis-jenis air tanah dan kandungan ion-ion utama [1]

Parameter (mg/L)	Jenis Air Tanah				
	<i>Magmatic Rock</i>	<i>Sand Stone</i>	<i>Carbonate Rock</i>	<i>Gypsum</i>	<i>Rock Salt</i>
$\text{Na}^{2+}$	5-15	3-30	2-100	10-40	hingga 1000
$\text{K}^{+}$	0.2-1.5	0.2-5	hingga 1	5-10	hingga 100
$\text{Ca}^{2+}$	4-30	5-40	40-90	hingga 100	hingga 1000
$\text{Mg}^{2+}$	2-6	0-30	10-50	hingga 70	hingga 1000
$\text{Fe}^{2+}$	hingga 3	0.1-5	hingga 0.1	hingga 0.1	hingga 2
$\text{Cl}^{-}$	3-30	5-20	5-15	10-50	hingga 1000
$\text{NO}_3^{-}$	0.5-5	0.5-10	1-20	10-40	hingga 1000
$\text{HCO}_3^{-}$	10-60	2-25	150-300	50-200	hingga 1000
$\text{SO}_4^{2-}$	1-20	10-30	5-50	hingga 100	hingga 1000
$\text{SiO}_3$	hingga 40	10-20	3-8	10-30	hingga 30

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui *scaling* yang diakibatkan oleh  $\text{CaCO}_3$  pada membran RO. Salah satu diantaranya menjelaskan prosedur laboratorium untuk mengetahui karakteristik kecenderungan



pembentukan kerak  $\text{CaCO}_3$  pada air umpan RO [25]. Penelitian lain mempelajari tentang *induction time* pembentukan kerak  $\text{CaCO}_3$  pada media berpori [26]; *scaling* yang diakibatkan oleh keberadaan  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  dan  $\text{SiO}_2$  pada air umpan dengan mempertimbangkan adanya pengaruh ion satu dengan yang lainnya [6, 19]; dan mempelajari pembentukan kerak  $\text{CaCO}_3$  pada membran RO dan membran nanofiltrasi (NF) [22]. Selain itu, terdapat pula penelitian yang menyimpulkan bahwa penebalan lapisan anorganik berupa  $\text{CaCO}_3$  pada permukaan membran dapat menurunkan permeabilitas dan meningkatkan tekanan operasi sistem [27, 28].

Dalam upaya meminimalisasi *scaling*, beberapa metode dikembangkan untuk memperkirakan kondisi batas operasi yang aman dan derajat saturasi garam-garam terlarut pada umpan. Kemampuan untuk memperkirakan potensi *scaling* merupakan hal yang sangat penting untuk mengendalikan keberadaannya di permukaan membran [6, 22]. Metode yang digunakan untuk memperkirakan potensi *scaling*  $\text{CaCO}_3$  pada umpan antara lain *Langelier Saturation Index* (LSI), *Stiff Davis Stability Index* dan *Ryznar Stability Index* [6]. Selain itu juga terdapat juga metode rasio supersaturasi yaitu perbandingan antara *ion activity product* dengan  $K_{sp}$  [22].

*Scaling* yang terjadi pada membran RO diawali dengan polarisasi konsentrasi akibat rejeksi garam-garam terlarut oleh membran pada saat proses. Pada keadaan tertentu, garam-garam tersebut akan mengalami supersaturasi yang diikuti oleh pembentukan inti kristal dan pertumbuhan kristal [6]. Metode yang digunakan untuk mengendalikan *scaling* adalah membatasi fluks permeat (produk) selama proses pemisahan [29]. Kelemahannya, adalah kuantitas produk yang dihasilkan tidak maksimal. Cara lain adalah penambahan *antiscalant*, yaitu penambahan *chemical agent* pada umpan secara berkala. Proses ini dapat menghambat pembentukan inti kristal [30]. Beberapa penelitian tentang *antiscalant* antara lain perbandingan 5 jenis *antiscalant* pada umpan yang memiliki nilai *Langelier Saturation Index* (LSI) 2,2-2,6 [6];  $\text{Zn}^{2+}$  sebagai penghambat *scaling* [31-32]; dan perbandingan 4 jenis *antiscalant* pada umpan yang mengandung  $\text{CaCO}_3$  pada kisaran LSI 0,4-1,7 [22]. Metode penambahan

*antiscalant* sangat menguntungkan jika diterapkan di instalasi skala besar, sedangkan pada instalasi skala kecil seperti rumah tangga, penambahan *antiscalant* merupakan metode yang kompleks, baik dari segi peralatan dan prosedur serta penakarannya.

Metode *autoflush* (*physical cleaning*) dimungkinkan cocok diterapkan untuk membran RO skala rumah tangga. Metode ini berbasis pada teknik mekanis penurunan tekanan operasi selama beberapa saat. Pada waktu tersebut umpan akan mendepolarisasi konsentrasi di permukaan membran [33-36]. Metode *autoflush* tidak menggunakan *chemical agent* dan secara otomatis bekerja saat proses pemisahan berlangsung. Metode ini tidak dapat digunakan pada membran RO bertekanan operasi tinggi (40-60 bar), karena penurunan dan peningkatan tekanan secara tiba-tiba dapat menyebabkan kerusakan pada modul membran. Beberapa penelitian yang mempelajari tentang *autoflush*, antara lain penelitian tentang aspek-aspek yang mempengaruhi proses *autoflush* [34] dan keefektifan permeat untuk proses *flushing* [35]. Selain itu, beberapa penemuan berkaitan dengan metode *autoflush* yang lebih banyak berfokus pada desain sistem peralatannya seperti paten metode *autoflush* dengan pipa *by-pass* pada alat kontrol laju alir konsentrasinya [33]; metode *autoflush* dengan air dingin [37] dan metode *autoflush* yang dikontrol secara hidrostatik dengan tekanan osmosis [38]. Disisi lain, keberhasilan metode *autoflush* secara kuantitatif dalam menghambat terjadinya *scaling* dan hubungannya dengan karakteristik umpan belum banyak diteliti.

Pada penelitian ini akan dilakukan studi terhadap mekanisme *scaling*  $\text{CaCO}_3$  yang terjadi pada membran RO skala rumah tangga dengan mengetahui perilaku penurunan fluks permeat yang menandai terjadinya *scaling*. Selain itu, penelitian ini juga mempelajari pengaruh *autoflush* sebagai salah satu cara mengendalikan *scaling* serta hubungannya dengan karakteristik umpan.

## **1.2. Perumusan Masalah**

*Scaling* merupakan salah satu permasalahan yang cukup rumit pada pengaplikasian membran RO. *Scaling* yang terjadi pada membran RO melalui

beberapa tahap, yaitu polarisasi konsentrasi, supersaturasi, pembentukan inti kristal, dan pertumbuhan kristal. Pada saat proses pemisahan, membran akan merejeksi zat terlarut yang terkandung pada umpan. Pada keadaan tertentu zat terlarut akan terkonsentrasi pada permukaan membran dan menyebabkan adanya perbedaan konsentrasi zat terlarut di larutan *bulk* dan di permukaan membran yang dinamakan polarisasi konsentrasi. Setelah konsentrasinya terpolarisasi, zat terlarut mencapai keadaan supersaturasi yang kemudian berlanjut ke tahap pembentukan inti kristal dan pertumbuhan kristal atau kerak. Karakteristik air umpan berupa nilai LSI (*Langelier Saturation Index*) menjadi penting untuk ditinjau pada proses terjadinya *scaling*. Penurunan fluks permeat yang signifikan pada nilai LSI tertentu dapat dijadikan salah satu parameter bahwa *scaling* telah terjadi pada membran RO.

*Autoflush* merupakan salah satu metode pengendalian *scaling* yang berbasis pada teknik mekanis penurunan tekanan operasi selama beberapa saat. Pada waktu tersebut umpan akan mendepolarisasi konsentrasi di permukaan membran. Dalam mengkaji keefektifan *autoflush* sebagai metode pengendalian *scaling*, dua parameter penting yang perlu diamati adalah interval, yaitu jarak waktu antara perlakuan *autoflush* yang pertama dan yang selanjutnya, dan waktu (durasi) yaitu lama proses *autoflush* berlangsung.

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan perilaku penurunan fluks permeat yang terjadi pada membran RO pada nilai LSI yang berbeda. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengamati keefektifan *autoflush* dan menentukan hubungan antara interval dan (waktu) durasi *autoflush* terhadap karakteristik air umpan yaitu nilai *Langelier Saturation Index* (LSI).

### **1.4. Ruang Lingkup Penelitian**

Penelitian ini dibatasi pada penggunaan membran jenis TCF (*Thin composite film*) dengan konfigurasi *spiral wound* jenis CSM RE-1812LP dan air umpan berupa larutan model ( $\text{CaCl}_2 + \text{NaHCO}_3$ ) yang memiliki nilai LSI

bervariasi antara 0 sampai dengan +1,5 serta tekanan operasi 5 kg/cm<sup>2</sup> dan waktu operasi 6 jam.

### **1.5. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini merupakan kajian eksperimental yang hasilnya berupa data empirik tentang fenomena *scaling* pada membran RO skala rumah tangga dan penggunaan metode *autoflush* sebagai salah satu cara mengatasi permasalahan *scaling*. Hasil dari penelitian ini dapat diterapkan pada perancangan membran RO skala rumah tangga dan dapat dijadikan acuan untuk penelitian pengembangan di masa depan.

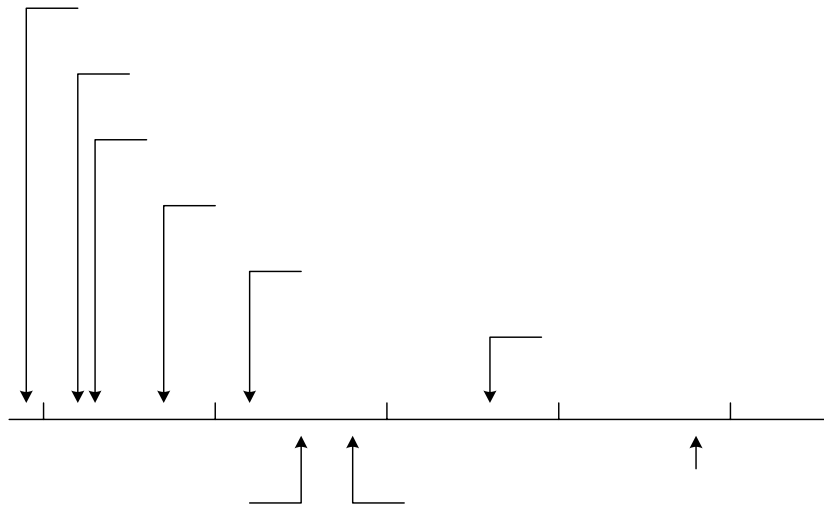
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Membran *Reverse osmosis*

##### 2.1.1 Perkembangan Membran

Membran adalah lapisan tipis yang dapat digunakan untuk memisahkan komponen yang berbeda berdasarkan sifat permeabilitasnya. Perbedaan sifat permeabilitas inilah yang menunjang proses membran untuk diterapkan di hampir seluruh bidang terutama industri kimia. Penelitian tentang sifat permeabilitas dan fenomena osmosis, pertama kali dipublikasikan oleh Abbe Nolet seorang peneliti berkebangsaan Perancis tahun 1748 [4, 9, 19, 30].



Gambar 2.1. Skema perkembangan *reverse osmosis* [6]

Perkembangan yang sangat pesat terjadi pada akhir abad 19, seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. [6]. Perkembangan teori *reverse osmosis* oleh Leob dan Sourirajan pada tahun 1960-an menjadikan membran sebagai salah satu teknologi yang berkembang dari proses pemisahan skala laboratorium menjadi proses

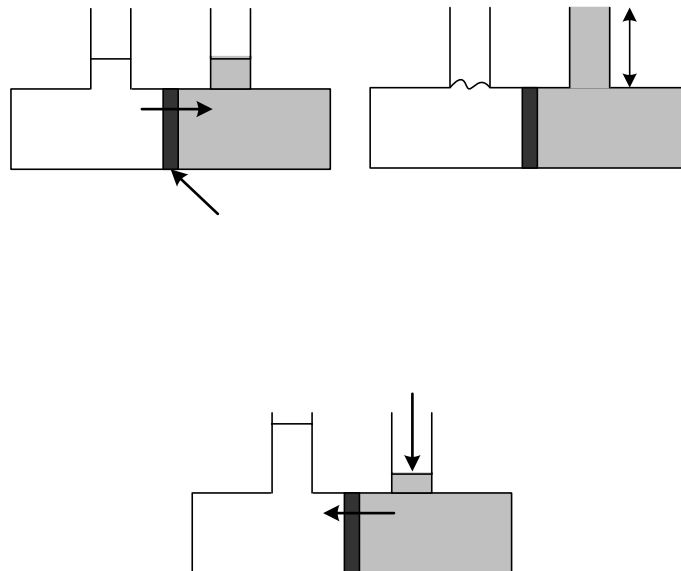
Demonstrasi kemampuan desalinasi f  
oleh Breton and Reid-1959

Pengembangan membran asim  
Loeb and Sourirajan-1962

pemisahan skala industri. Para peneliti ini menyatakan bahwa perbedaan sifat permeabilitas antara garam dan air yang dipisahkan oleh membran selulosa asetat dapat menjadi dasar proses desalinasi air secara ekonomis yang disebut *reverse osmosis* [39].

### 2.1.2. Definisi *Reverse osmosis*

Osmosis merupakan fenomena alam yaitu peristiwa mengalirnya pelarut (biasanya air) mengalir melewati dinding lapisan semi permeabel, dari larutan konsentrasi zat terlarut rendah ke larutan dengan konsentrasi zat terlarut tinggi [39].



Gambar 2.2. Skema fenomena osmosis dan *reverse osmosis* [39]

Pada Gambar 2.2.a. air mengalir dari konsentrasi zat terlarut rendah ke konsentrasi zat terlarut tinggi sampai kesetimbangan kimia pada larutan terjadi. Saat kesetimbangan, perbedaan tekanan antara dua sisi membran sebanding dengan tekanan osmosis larutan dan untuk membalikkan aliran air (pelarut), maka

Konsentrasi  
rendah

aliran air

Konsentrasi  
tinggi

Sisi 1

Sisi 2

$c_{s1} = c_{s2}$

Membran

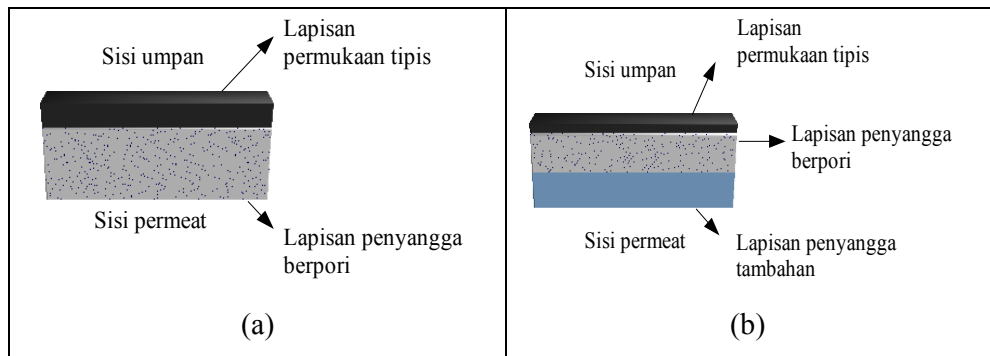
larutan yang memiliki konsentrasi zat terlarut tinggi harus diberi tekanan yang lebih besar dibandingkan tekanan osmosisnya seperti yang terlihat pada Gambar 2.2.b. [39]. Pada sistem pemisahan air, akan dihasilkan air murni dari konsentrasi zat terlarut tinggi ke konsentrasi rendah dengan menggunakan konsep *reverse osmosis*.

### **2.1.3. Tipe dan Konfigurasi Membran *Reverse osmosis***

Membran untuk kebutuhan komersial harus memiliki sifat permeabilitas yang tinggi terhadap air dan memiliki derajat semipermeabilitas yang tinggi dalam arti laju transportasi air melewati membran harus jauh lebih tinggi dibandingkan laju transportasi ion-ion yang terlarut dalam umpan. Membran juga harus memiliki ketahanan (stabil) terhadap variasi pH dan suhu. Kestabilan dari sifat-sifat tersebut dalam periode waktu dan kondisi tertentu dapat didefinisikan sebagai umur membran yang biasanya berkisar antara 3-5 tahun [39].

Membran RO bertindak sebagai "*barrier*" yang bersifat semi permeabel yang dengan mudah melewatkan komponen secara selektif (pelarut, biasanya air) dan menghalangi zat terlarut secara parsial maupun keseluruhan. Air akan berpindah dari sisi umpan ke sisi permeat dengan proses difusi dengan tekanan sebagai *driving force* [19]. Gradien potensial kimia pada membran menghasilkan *driving force*  $-\Delta\mu_s$  yaitu gradien potensial kimia zat terlarut, biasanya berupa perbedaan konsentrasi dan  $-\Delta\mu_w$  yaitu gradien potensial kimia pelarut, biasanya berupa perbedaan tekanan yang mendorong larutan untuk melewati membran [39]. Tekanan operasi pada membran RO berkisar antara 3,4-60 bar. Proses yang terjadi pada membran RO merupakan proses hiperfiltrasi yang dapat menahan komponen-komponen seperti bakteri, garam, gula, protein, serta komponen lain yang memiliki berat molekul lebih dari 150-250 daltons [19].

Tipe membran RO dibagi menjadi dua kategori yaitu, (1) membran asimetrik yang terdiri dari satu jenis polimer dan (2) membran komposit dengan lapisan tipis (*thin film composite membrane*) yang terdiri dari dua atau lebih jenis lapisan polimer.



Gambar 2.3. Skema tipe membran RO; a) membran asimetrik; b) membran komposit dengan lapisan tipis (*thin film composite membrane*) [39]

Membran asimetrik (Gambar 2.3.a) memiliki lapisan permselektif yang sangat tipis ( $0.1-1 \mu\text{m}$ ) pada bagian permukaannya yang berpengaruh pada fluks serta selektifitas dari membran. Lapisan bawah berupa lapisan penyangga berpori merupakan penyangga mekanis yang tidak terlalu berpengaruh pada proses pemisahan. Membran komposit dengan lapisan tipis (*Thin film composite membrane*) (Gambar 2.3.b) terdiri dari lapisan polimer yang sangat tipis ( $\leq 0,1 \mu\text{m}$ ) bertindak sebagai "barrier" yang menghasilkan fluks air tinggi. Biasanya lapisan ini menggunakan jenis polimer yang berbeda dengan lapisan permukaan.

Membran RO yang paling sering digunakan dalam industri pemurnian air adalah membran yang berbahan selulosa asetat (CA), selulosa triasetat (CTA), dan poliamida (PA). Perbedaan diantara ketiga jenis membran RO dapat dilihat pada Tabel 2.1. [19].

Tabel 2.1. Jenis membran RO [19]

Batasan	Membran Selulosa Asetat	Membran Selulosa Triasetat	Lapisan tipis membran komposit
pH	pH 2-8	pH 4-9	pH 2-11
Temperatur	$5^{\circ}\text{C}-30^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}-35^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}-50^{\circ}\text{C}$
Ketahanan terhadap serangan bakteri	Lemah	Kuat	Sangat kuat
Ketahanan terhadap klorin	0-1 ppm	0-3 ppm	0-0.1 ppm-
Rejeksi terhadap garam saat 60 psi	85-92%	92-96%	94-98%
Rejeksi terhadap nitrat saat 60 psi	30-50%	40-60%	70-90%
Cost relatif	Rendah	Menengah	Tinggi

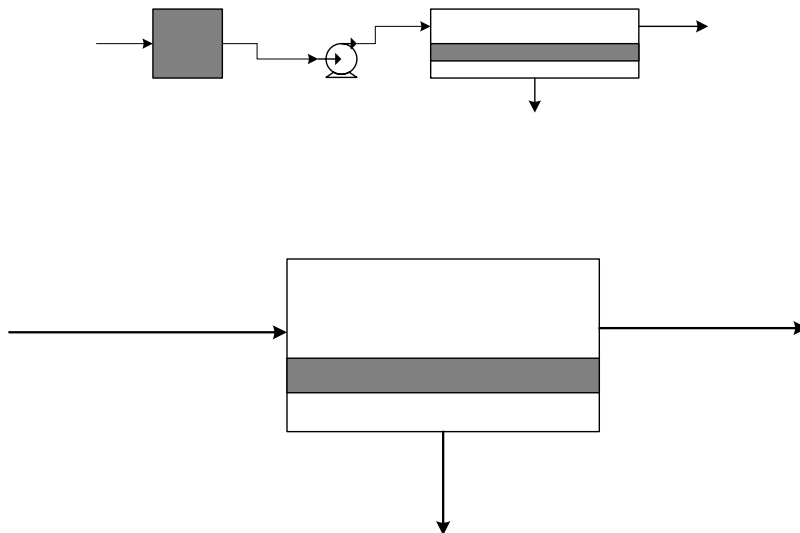
Selain material membran, desain modul membran juga berpengaruh pada keefektifan membran RO sebagai salah satu teknologi pemisahan. Jenis modul



membran antara lain *plate-and-frame*, *tubular*, *spiral-wound*, dan *hollow-fiber*. Modul *plate-and-frame* terdiri dari lembaran membran yang disusun pada rangka yang memiliki jarak tertentu satu dengan yang lainnya. Modul *tubular* terdiri dari membran berbentuk pipa berdiameter 1,3 cm, disusun pada pipa *stainless steel*. Modul *spiral-wound* terdiri dari lembaran membran yang disusun lalu digulung menyerupai gulungan kain. Modul ini lebih efektif dari segi teknis dan ekonomi apabila dibandingkan dengan modul *plate-and-frame* dan *tubular*. Modul *hollow-fiber* terdiri dari banyak membran berbentuk pipa kapiler dengan diameter  $\leq 200$   $\mu\text{m}$  yang ditempatkan pada vessel bertekanan. Modul ini memiliki kelemahan antara lain sangat mudah terkena *fouling* dan tidak dapat diterapkan pada beberapa proses pemisahan [39].

#### 2.1.4. Terminologi dan Deskripsi Proses Membran RO

Proses membran RO relatif sederhana. Proses ini terdiri dari umpan sumber air, pretreatment umpan, pompa, dan modul membran RO, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.4.a.



Gambar 2.4. Sistem membran RO dan alirannya [39]

Beberapa aliran yang terdapat pada membran berikut dengan variabel yang terkait diperlihatkan pada Gambar 2.4.b: (1) Aliran umpan, (2) Aliran permeat (produk), dan (3) Aliran retentat [39].

Efektivitas aliran air melewati membran dapat dilihat dari parameter fluks  $J_w$  :

$$J_w = \frac{\text{tingkat permeasi (volumetrik atau massa)}}{\text{area membran}} \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan  $J_w$  adalah Fluks air pada aliran permeat, sedangkan untuk zat terlarut:

$$J_s = \frac{\text{tingkat permeasi (massa)}}{\text{area membran}} \dots\dots\dots(2.2)$$

dengan  $J_s$  adalah fluks zat terlarut pada aliran permeat.

Pemisahan zat terlarut diketahui dengan parameter "rejection"  $R$ :

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan  $C_p$  dan  $C_f$  adalah konsentrasi zat terlarut pada permeat dan umpan.

Kuantitas air umpan yang melewati membran (permeat) diketahui dengan menghitung parameter *recovery* air 'r' :

Untuk sistem batch :

$$r = \frac{\sum J_w A_M \Delta t}{V_F} = \frac{V_P}{V_F} \dots\dots\dots(2.4)$$

$V_P$  dan  $V_F$  adalah volume permeat dan umpan,  $A_M$ , luas permukaan membran dan  $\Delta t$  adalah perbedaan waktu.

Untuk sistem kontinyu :

$$r = \frac{J_w A_M}{F_F} = \frac{F_P}{F_F} \dots\dots\dots(2.5)$$

$F_P$  dan  $F_F$  adalah laju alir permeat dan umpan.

Pada membran sistem *batch*, air dari umpan akan mengalami peningkatan konsentrasi zat terlarut  $C_F$  pada aliran umpan secara bertahap akibat proses perpindahan air, akan tetapi pada sistem kontinyu, umpan memiliki konsentrasi yang konsisten pada setiap waktu [39].

#### **2.1.5. Aplikasi Membran *Reverse osmosis* untuk Skala Rumah Tangga**

Membran RO telah banyak diterapkan diberbagai bidang termasuk desalinasi air laut dan air payau, penanganan air limbah, industri makanan dan minuman, separasi *biomedical*, purifikasi air untuk air minum dan kebutuhan industri. Selain itu membran RO juga digunakan untuk memproduksi "*ultra pure water*" untuk industri semikonduktor [40].

Perkembangan teknologi membran RO pada aplikasi skala rumah tangga memiliki prospek baik dimasa depan ditinjau dari segi teknis dan ekonominya, serta memungkinkan masyarakat untuk memiliki sistem pengolahan air sendiri yang praktis dan ekonomis [7]. Beberapa desain dan konfigurasi sistem RO dengan kelebihan masing-masing telah dipatenkan seperti, sistem RO reguler untuk instalasi rumah tangga [12]; sistem RO instalasi rumah tangga yang dilengkapi dengan filter sedimen sebagai unit *pre-filter* [13]; sistem RO instalasi rumah tangga yang dilengkapi dengan filter sedimen sebagai unit *pre-filter* dan karbon aktif sebagai *post-filter* [14]; sistem RO instalasi rumah tangga yang dapat menyediakan air bersih secara kontinyu tanpa menghasilkan limbah [15]; sistem RO instalasi rumah tangga dengan desain dan konfigurasi yang lebih efisien dibandingkan dengan desain yang lain [16]; sistem RO skala rumah tangga yang dilengkapi dengan sistem pembuangan *drain* secara langsung [17]; sistem RO instalasi rumah tangga dilengkapi sistem *backwashable* [18].

Aplikasi sistem RO skala rumah tangga dapat dibagi menjadi beberapa tipe sesuai dengan kapasitas dan penggunaannya, yaitu tipe *undersink*, *whole house*, *multi family*, dan *farm and ranch* [41]. Tipe *undersink* merupakan sistem RO yang didesain untuk memenuhi kebutuhan air minum dalam rumah. Tipe ini biasanya dipasang dibawah wastafel yang terdapat di dapur. Kapasitas produksi dari tipe *undersink* berkisar antara 95-378 kemasan galon/hari. Tipe *whole house*

didesain untuk memenuhi kebutuhan air di dalam sebuah rumah tangga, seperti air minum, air untuk memasak, air untuk mandi, dsb. Tipe ini lebih besar dibandingkan tipe *undersink*. Sistem yang diterapkan pada tipe *whole house* meliputi *pre-filter* seperti karbon aktif, dan penambahan *antiscalant*, unit RO, tangki penampung serta *re-pressurization system* yang memudahkan proses pemurnian air. Sistem yang digunakan pada tipe *multi family* dan *farm and ranch* sama dengan tipe *whole house*. Perbedaannya terletak pada kapasitas dan skala produksinya. Tipe *multi family* biasanya digunakan pada kompleks apartemen yang kecil ( $\pm 4$  rumah) dan tipe *farm and ranch* biasanya digunakan untuk memenuhi kebutuhan banyak rumah atau peternakan serta kebutuhan air untuk pemeliharaan ternak dengan kapasitas 7-37 L/menit.

## 2.2. Polarisasi Konsentrasi

Peristiwa *scaling* pada sistem membran RO diawali dengan terjadinya polarisasi konsentrasi pada permukaan membran [9]. Polarisasi konsentrasi (CP) adalah akumulasi ion yang direjeksi saat proses pemisahan yang membentuk lapisan pada permukaan membran. Akibat tingginya konsentrasi dipermukaan membran, maka tekanan osmotik meningkat dan menurunkan fluks permeat melewati membran. Fenomena ini juga berdampak pada derajat supersaturasi komponen-komponen yang terlarut, sehingga dapat meningkatkan potensi terjadinya *scaling* (SPI) pada permukaan membran. Oleh karena itu, CP harus dihitung secara akurat untuk penentuan SPI. CP dan *fouling* (*scaling*) sangat berpengaruh pada umur membran dan fluks permeat [19]. CP dapat dihubungkan dengan derajat supersaturasi seperti pada persamaan berikut:

$$\text{Supersaturasi (SS)} = \frac{C_m}{C_s} = CP \frac{C_b}{C_s} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan,  $C_m$  = konsentrasi zat terlarut pada permukaan membran ( $\text{g/cm}^3$ )

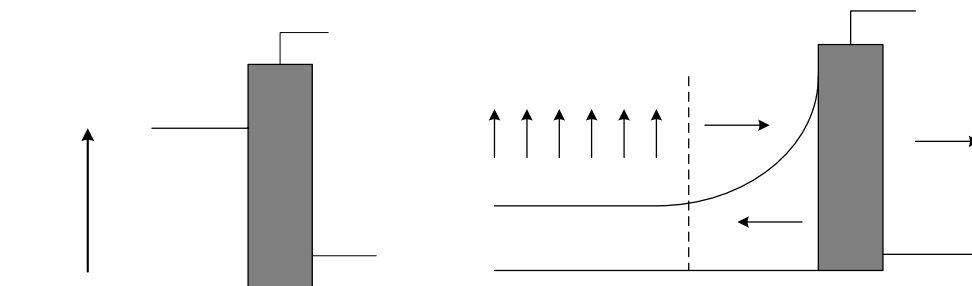
$C_b$  = konsentrasi zat terlarut pada larutan *bulk* ( $\text{g/cm}^3$ )

$C_s$  = konsentrasi zat terlarut pada saat jenuh (*saturation level*) ( $\text{g/cm}^3$ )

Beberapa model teoritis dikembangkan untuk menganalisa fenomena polarisasi konsentrasi. Michaels mengajukan teori model pertama yang

menjelaskan efek dari proses polarisasi konsentrasi pada sistem ultrafiltrasi dan dikenal dengan teori *gel-polarization (film theory model)*. Selain itu terdapat pula model polarisasi konsentrasi berdasarkan tekanan osmotiknya seperti teori Spiegler-Kedem dan *solution-diffusion models* [19].

Model film yang sederhana melibatkan persamaan perpindahan massa difusi-konveksi dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Konsep dasar pemisahan dengan membran dan polarisasi konsentrasi pada kondisi tunak

Pada keadaan tunak dalam sistem membran, kesetimbangan zat terlarut dapat didefinisikan dalam bentuk persamaan diferensial sebagai berikut:

$$J_s = C_p J_v = C J_v - \left[ D \left( \frac{dC}{dx} \right) \right] \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan:  $J_s$  = fluks netto zat terlarut yang melewati membran ( $\text{gr/cm}^3 \cdot \text{s}$ )

$C_p$  = konsentrasi zat terlarut pada permeat ( $\text{g/cm}^3$ )

$J_v$  = fluks permeat ( $\text{gr/cm}^3 \cdot \text{s}$ )

$C$  = konsentrasi zat terlarut pada *boundary layer* ( $\text{g/cm}^3$ )

$D$  = koefisien difusi zat terlarut dalam air ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

membran

Persamaan 2.7 dapat diintegrasikan pada kondisi batas misalnya batas atas adalah konsentrasi zat terlarut pada permukaan membran dan batas bawah adalah konsentrasi zat terlarut pada larutan *bulk* serta *boundary layer* ketebalan,  $\delta$ .

Penyelesaian persamaan 2.7 menghasilkan konsentrasi polarisasi konsentrasi  $C_p$  model teori film.

$$CP = \frac{C_m - C_p}{C_b - C_p} = \exp\left(\frac{J_v}{k}\right) \dots\dots\dots(2.8)$$

Dengan:  $C_m$  = konsentrasi zat terlarut pada permukaan membran ( $\text{g/cm}^3$ )

$C_b$  = konsentrasi zat terlarut pada larutan *bulk* ( $\text{g/cm}^3$ )

$C_p$  = konsentrasi zat terlarut pada permeat ( $\text{g/cm}^3$ )

$k$  =  $D/\delta$ , koefisien perpindahan massa yang bergantung pada berat molekul dari komponen.

CP sangat bergantung pada dua parameter, yaitu  $J_v$  dan  $k$  seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.8. Fluks permeat dapat dengan mudah diukur dan koefisien perpindahan massa yang hanya dipengaruhi oleh aliran geometri, *Reynold number* dan *Schmidt number* dapat dihitung dengan menggunakan korelasi teoritis. Persamaan 2.8 juga dapat dinyatakan dengan rejeksi membran. Rejeksi aktual  $R$  bergantung pada konsentrasi zat terlarut pada permukaan membran.

$$R = \frac{C_m - C_p}{C_m} \dots\dots\dots(2.9)$$

Fraksi rejeksi yang teramati ( $R_{\text{obs}}$ ) yang menyatakan kinerja membran berdasarkan konsentrasi zat terlarut pada larutan *bulk* dapat dihitung dengan persamaan :

$$R_{\text{obs}} = \frac{C_b - C_p}{C_b} \dots\dots\dots(2.10)$$

Berikut persamaan polarisasi konsentrasi apabila dihubungkan dengan rejeksi :

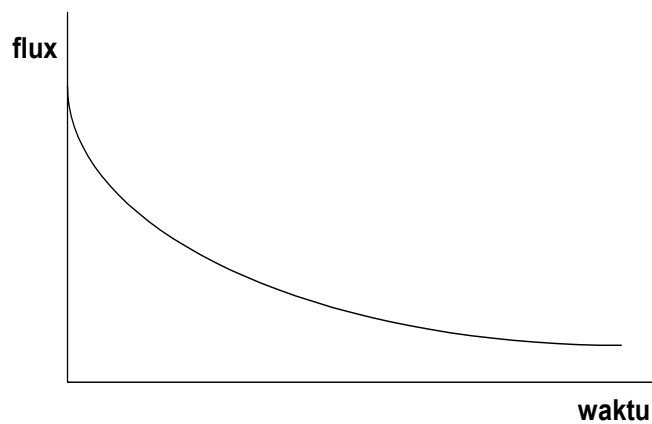
$$\frac{1 - R_{\text{obs}}}{R_{\text{obs}}} = \frac{1 - R}{R} \exp\left(\frac{J_v}{k}\right) \text{ atau } \frac{J_v}{k} = \ln \frac{1 - R_{\text{obs}}}{R_{\text{obs}}} - \ln \frac{1 - R}{R} \dots\dots\dots(2.11)$$

Perbedaan yang mendasar antara model *solution-diffusion* dan model tekanan osmotik adalah adanya parameter perpindahan  $\sigma$ . Pada model *solution-diffusion* parameter perpindahan berada pada range  $0 < \sigma < 1$ . Sedangkan pada model Kombinasi Spiegler-Kedem sama dengan *solution-diffusion models* apabila  $\sigma = 1$ .

## 2.3. *Scaling* pada Membran RO

### 2.3.1. Pengertian *Scaling*

Pada proses membran definisi tentang *fouling* dan *scaling* terkadang membingungkan. *Fouling* dapat didefinisikan sebagai proses terbentuknya lapisan oleh material yang tidak diinginkan pada permukaan membran. Secara teknis, *scaling* didefinisikan sebagai akumulasi kerak (*scale*) akibat adanya peningkatan konsentrasi dari materi anorganik yang melewati hasil kali kelarutannya pada permukaan membran dan menyebabkan penurunan kinerja membran [22]. Sehingga definisi *fouling* sudah termasuk *scaling*. Dalam penggunaannya, istilah *fouling* lebih banyak pada materi biologis dan koloid, sedangkan istilah *scaling* digunakan untuk pengendapan garam atau mineral anorganik [19].



Gambar 2.6. Fluks sebagai fungsi dari waktu [9]

*Fouling* atau *scaling* merupakan permasalahan umum yang selalu ditemukan dalam proses membran. *Fouling* atau *scaling* dapat mengurangi fluks pada permeat dan rejeksi material tidak diinginkan yang terkandung pada umpan, serta dapat meningkatkan tekanan operasi dan menyebabkan kerusakan membran hingga pada akhirnya mengurangi ketahanan serta memperpendek umur membran [9, 19, 20]. Dampak langsung yang dapat diamati dan cukup signifikan yang menandai terjadinya *scaling* ini adalah menurunnya kinerja membran (fluks permeat menurun seiring waktu), seperti yang terlihat pada Gambar 2.6. [9].

Penurunan fluks dapat terjadi akibat pengaruh dari beberapa faktor antara lain polarisasi konsentrasi, adsorpsi, pembentukan lapisan gel (*gel layer formation*) dan penyumbatan pada pori. Faktor-faktor tersebut mempengaruhi resistensi total pada umpan yang akan melewati membran [9]. Fluks dapat didefinisikan sebagai :

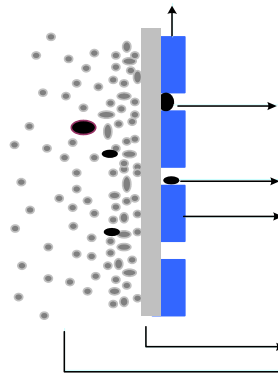
$$flux = \frac{driving\ force}{viskositas \times resistensi\ total} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\text{atau } flux = \frac{\Delta P}{\eta \times R_{total}} \dots\dots\dots (2.13)$$

Pada keadaan ideal resistensi yang berpengaruh pada membran hanya resistensi membran itu sendiri,  $R_m$ , tetapi membran memiliki batas resistensi tertentu terhadap zat terlarut maka akan terjadi akumulasi zat terlarut yang tertahan oleh membran di sekitar permukaan membran. Hal ini menyebabkan terbentuknya lapisan zat terlarut yang terkonsentrasi, sehingga menimbulkan resistensi baru terhadap proses perpindahan massa yaitu resistensi polarisasi konsentrasi  $R_{cp}$ .

Zat terlarut yang terkonsentrasi ini memiliki kecenderungan yang besar untuk membentuk lapisan gel dipermukaan membran dan menghasilkan resistensi lapisan gel  $R_g$ . Pada kasus membran berpori, terdapat kemungkinan zat terlarut masuk kedalam pori membran dan menyumbat pori sehingga timbul *pore blocking* resistance  $R_p$ . Akhirnya, resistensi total bertambah akibat fenomena adsorpsi  $R_a$ . Hal-hal tersebut terjadi pada semua jenis membran, baik yang berpori maupun yang tidak berpori [9]. Jenis-jenis resistensi yang berpengaruh pada membran terlihat pada Gambar 2.7.





Sisi ump

Gambar 2.7. Tipe resistensi pada membran saat perpindahan massa melewati membran dengan *driving force* tekanan.

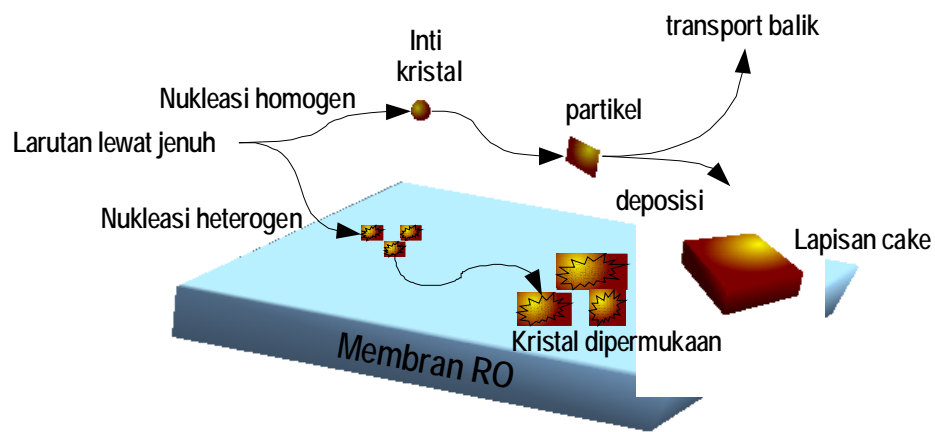
### 2.3.2. Mekanisme *Scaling* $\text{CaCO}_3$ pada Membran RO

Potensi *scaling* yang disebabkan oleh garam  $\text{CaCO}_3$  (kalsium karbonat) dimiliki hampir disemua jenis sumber air di dunia seperti air permukaan, air tanah, air payau, air laut serta air limbah. Kalsium karbonat membentuk padatan atau deposit yang sangat kuat menempel pada permukaan membran. Se jauh ini  $\text{CaCO}_3$  merupakan penyebab *scaling* pada beberapa sistem seperti instalasi *cooling water* [22].

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui lebih dalam tentang *scaling* yang diakibatkan oleh  $\text{CaCO}_3$  pada membran RO. Salah satu diantaranya menjelaskan prosedur laboratorium untuk mengetahui karakteristik kecenderungan pembentukan kerak  $\text{CaCO}_3$  pada air umpan RO [25]. Penelitian lain mempelajari tentang *induction time* pembentukan kerak  $\text{CaCO}_3$  pada media berpori [26] dan mekanisme dan permodelan tentang fenomena *scaling* yang terjadi pada membran RO [24]; *scaling* yang diakibatkan oleh keberadaan  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  dan  $\text{SiO}_2$  pada air umpan dengan mempertimbangkan adanya pengaruh ion satu dengan yang lainnya [6, 19]; dan mempelajari pembentukan kerak  $\text{CaCO}_3$  pada membran RO dan membran nanofiltrasi (NF) [22].

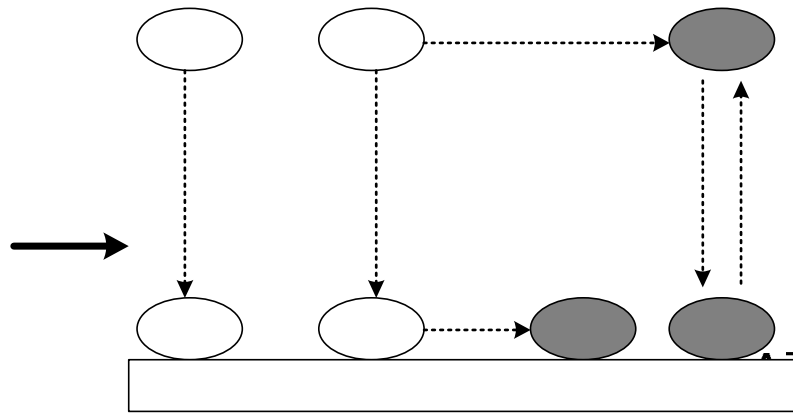
Proses pembentukan kerak merupakan proses sangat rumit yang melibatkan mekanisme kristalisasi dan transportasi hidrodinamik. Terdapat dua

mekanisme kristalisasi yang sampai saat ini bisa dideteksi dari fenomena *scaling* yaitu, kristalisasi permukaan (heterogen) dan kristalisasi *bulk* (homogen). Pada kristalisasi permukaan, penurunan fluks terjadi akibat adanya pertumbuhan deposit kerak secara lateral yang memblokir permukaan membran, sedangkan pada kristalisasi *bulk*, kristal terbentuk pada sedimen larutan *bulk* dipermukaan membran yang menyebabkan terjadinya penurunan fluks. Gambar 2.8. mengilustrasikan kedua skema pembentukan kerak pada sistem membran RO [24].



Gambar 2.8. Mekanisme *scaling* pada membran RO [24]

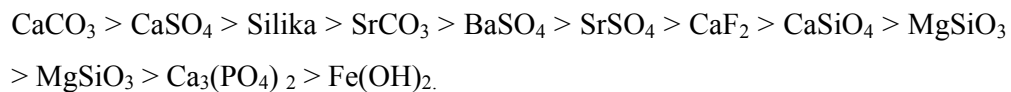
Hal yang hampir sama telah ditemukan sebelumnya oleh Cohen (2002) pada penelitian tentang mekanisme *scaling*  $\text{CaSO}_4$  seperti yang terlihat pada Gambar 2.9 [6, 42]. *Scaling* diawali oleh polarisasi konsentrasi yang telah dibahas tersendiri pada bagian 2.2. Mekanisme selanjutnya adalah: (1) *Induction time* untuk proses inisiasi kristal; (2) Transportasi kristal (*crystal transportation*); (3) Pengikatan kristal (*crystal attachment*); (4) *Removal*; (5) *Ageing*



Gambar 2.9. Mekanisme *scaling* [42]

*Induction time* didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan untuk mencapai pembentukan kristal dari keadaan supersaturasi. *Induction time* sangat dipengaruhi oleh derajat supersaturasi dan temperatur. Perpindahan komponen-komponen zat terlarut ke permukaan membran (*crystal transportation*) dipengaruhi oleh berbagai macam proses seperti difusi, sedimentasi, turbulen, dan termoporesis. Sedangkan pengikatan kristal mengacu pada proses terikatnya zat terlarut pada permukaan membran yang dipengaruhi gaya *Van der Waals*, elektrostatis, tegangan permukaan, dan properti dari zat terlarut seperti densitas, elastisitas serta kondisi permukaannya. Saat pertumbuhan kristal pada permukaan membran konstan, maka akan terjadi kesetimbangan antara deposisi dan perpindahan kristal (*removal*). Proses ageing akan terjadi sesaat setelah proses deposisi. Pada tahap ini dimungkinkan terjadi perubahan struktur kimia atau kristal yang akan menaikkan atau menurunkan kekuatan dari deposisi tersebut.

Kerak yang umumnya terbentuk dalam membran saat proses pemurnian air adalah kalsium karbonat, kalsium sulfat, kalsium posphat, barium sulfat, strontium sulfat,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , silikon dioksida (silika) [4, 22], dan garam/mineral tersebut dapat diurutkan sesuai dengan kecepatan pengendapannya [4]:



### 2.3.3. Potensi *Scaling* pada Umpan

Pada proses pemurnian air menggunakan membran RO, garam-garam seperti  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  dan silika adalah jenis garam yang mudah membentuk *scale* (kerak). Oleh karena itu, untuk menghindari penurunan kinerja dari membran akibat *scaling* perlu diketahui seberapa besar potensi *scaling* dan batasan-batasan pada saat proses pemisahan terjadi [19, 25]. Beberapa metode dikembangkan untuk memprediksikan potensi *scaling*, khususnya *scaling potential index* untuk kalsium karbonat  $\text{CaCO}_3$  yang sering diterapkan dalam industri adalah *Langelier Saturation Index* (LSI), *Stiff Davis Stability Index* (S&DSI) dan *Ryznar Stability Index* (RSI) [19].

#### A. *Langelier Saturation Index* (LSI)

Langelier Saturation Index (LSI) adalah metode yang digunakan untuk memprediksi stabilitas kalsium karbonat dalam air. LSI ini dapat memprediksikan keadaan kalsium karbonat apakah membentuk endapan, larut atau berada pada kesetimbangan dengan air [43]. Langelier mengembangkan metode untuk memprediksi pH saat kalsium karbonat berada dalam kondisi jenuh yang disebut pHs. Metode ini dapat digunakan pada sistem air yang mengandung TDS kurang dari 10.000 mg/L. LSI didefinisikan sebagai delta antara pH aktual sistem dengan pH saturasi pada keadaan jenuh [19, 43]. Tabel 2.2. menunjukkan nilai LSI berdasarkan potensi *scaling* yang terdapat dalam larutan.

Tabel 2.2. Potensi *scaling* berdasarkan nilai LSI [19]

LSI	Potensi <i>Scaling</i>
(-)	Tidak ada potensi terjadinya <i>scaling</i> dan air akan melarutkan $\text{CaCO}_3$
(+)	<i>Scaling</i> dapat terjadi dan $\text{CaCO}_3$ akan terendapkan
Mendekati nol	Ambang batas dari potensi <i>scaling</i> . Kualitas air dan perubahan temperatur dapat mengubah indeks

Untuk menghitung LSI, perlu diketahui data-data seperti jumlah kalsium  $\text{Ca}^{2+}$  (mg/L sebagai  $\text{CaCO}_3$ ), alkalinity (mg/L sebagai  $\text{CaCO}_3$ ), TDS (mg/L), pH dan temperatur sistem [19, 43, 44].

Persamaan:

$$LSI = pH - pHs \dots\dots\dots(2.14)$$

$$pHs = (9,3 + A + B) - (C + D) \dots\dots\dots(2.15)$$

dengan,

$$A = \frac{(\log_{10}[TDS] - 1)}{10}$$

$$B = -13,12 \times \log_{10}(T^{\circ}C + 273) + 34,55$$

$$C = \log_{10}[Ca^{2+}] - 0,4$$

$$D = \log_{10}[alkalinity]$$

Namun persamaan diatas terkoreksi akibat keberadaan nilai koefisien aktivitas, *ionic strength* dan muatan dari masing-masing ion yaitu  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $H^+$  sehingga persamaan pHs menjadi:

$$pHs = -\log \left\{ \frac{K_a \gamma_{Ca^{2+}} [Ca^{2+}] \gamma_{HCO_3^-} [HCO_3^-]}{\gamma_{H^+} K_{sp}} \right\} \dots\dots\dots(2.16)$$

dengan,

$K_a$  = konstanta kesetimbangan karbonat/bikarbonat terhadap waktu

$$= 9,2 \cdot 10^{-13} T + 2,3 \cdot 10^{-11}$$

$$\gamma = \text{koefisien aktivitas} = 10^{\frac{0,5(Z_i)^2 \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}}}$$

$Z_i$  = muatan ion

$I$  = *ionic strength* larutan dalam hal ini adalah air

$$= 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ TDS}$$

$K_{sp}$  = hasil kali kelarutan sebagai fungsi waktu

$$= 9,237 \cdot 10^{-9} e^{-0,0277T}$$

## B. *Stiff Davis Stability Index (S&DSI)*

*Stiff Davis Stability Index* berusaha memperkuat prediksi *Langelier Saturation Index* (LSI) yang mendasarkan perhitungan prediksi pada TDS (*total dissolved solid*) dengan menambahkan parameter baru yaitu efek dari ion-ion tertentu terhadap *driving force* yang mendorong terjadinya *scaling*. Secara teknis,

*Stiff Davis Stability Index* diterapkan pada aliran umpan dengan konsentrasi diatas 10.000mg/L [19].

Sama seperti LSI, S&DSI ini menggunakan konsep saturasi (keadaan jenuh). *Stiff Davis Stability Index* memprediksi potensi *scaling* pada air lebih rendah dibandingkan dengan perhitungan prediksi LSI untuk keadaan yang sama. Perbedaan perhitungan ini akibat efek dari ion-ion tertentu terhadap *driving force* yang mendorong terjadinya *scaling* [19].

Persamaan:

$$S \& DSI = pH - pHs \dots\dots\dots(2.17)$$

pH adalah pH sistem dan pHs adalah pH saturasi berdasarkan keberadaan kalsium karbonat :

$$pHs = \rho Ca + \rho Alk + K \dots\dots\dots(2.18)$$

$\rho Ca$  adalah fungsi dari konsentrasi kalsium ( $Ca^{2+}$ ) sedangkan  $\rho Alk$  merupakan fungsi dari  $HCO_3^-$  dan K.

#### 2.3.4. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi *Scaling*

Pada membran RO, terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi terjadinya penurunan fluks dan *scaling* yaitu sifat kimia-fisik dari zat terlarut, *psychochemical interaction*, sifat kimia-fisik membran, dan parameter operasi (*operating parameter*) [19].

##### 1. Sifat kimia-fisik dari zat terlarut pada umpan

Sifat kimia-fisik (*psychochemical properties*) dari zat terlarut pada umpan dapat didefinisikan sebagai kandungan koloid, pH, derajat supersaturasi, nukleasi dan tekanan osmotik. Diantara sifat kimia-fisik dari zat terlarut tersebut, kelarutan dan derajat supersaturasi merupakan hal yang paling berpengaruh terhadap *scaling* [45]. Selain itu pre treatment terhadap zat terlarut pada umpan dapat menurunkan sifat kimia-fisik serta dapat mereduksi dan meminimalisasi *fouling* [46].

##### 2. *Psychochemical interaction*

Contohnya: gaya *Van der Walls* dan gaya elektrostatik.

3. Sifat kimia-fisik membran

Contohnya: morfologi dan muatan dari permukaan membran. Pengaruh topologi dan muatan permukaan membran terhadap potensi *scaling* [27].

4. Parameter Operasi

Parameter operasi seperti: temperatur, perbandingan permeat dengan umpan (*recovery*), fluks permeat dan hidrodinamika dari sistem dapat berpengaruh terhadap *scaling*. Pada membran RO dengan air umpan yang mengandung  $\text{CaSO}_4$  menyatakan bahwa adanya pengaruh dari % *recovery* (% produk/umpan) terhadap potensi terjadinya *scaling* pada membran RO [47]. *Recovery* tertinggi 78%, memiliki *induction time* (waktu yang dibutuhkan untuk membentuk inti kristal) paling pendek dibandingkan dengan *recovery* yang lebih rendah.

Selain itu, faktor-faktor yang berpengaruh terhadap *scaling* adalah konsentrasi garam-garam yang terlarut dalam air umpan, temperatur operasi, kecepatan aliran fluida, pH sistem dan waktu operasi [48].

### **2.3.5. Metode untuk Mengatasi *Scaling***

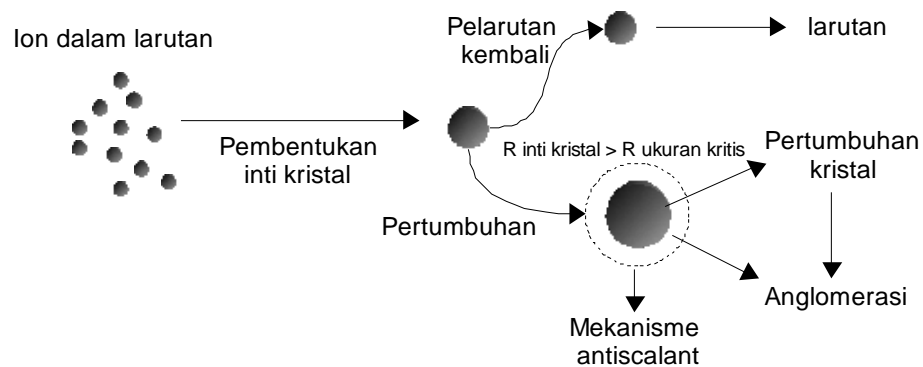
Banyak penelitian telah difokuskan untuk mencari cara yang paling efektif dan efisien untuk mencegah dan meminimalisasi terjadinya proses *scaling*, mengingat mekanisme dan proses *scaling* ini sangat kompleks dan bergantung pada jenis air umpan dan membran yang digunakan. Beberapa penelitian tentang *antiscalant* antara lain perbandingan 5 jenis *antiscalant* pada umpan yang memiliki nilai *Langelier Saturation Index* (LSI) 2,2-2,6 [6];  $\text{Zn}^{2+}$  sebagai penghambat *scaling* [31-32]; dan perbandingan 4 jenis *antiscalant* pada umpan yang mengandung  $\text{CaCO}_3$  pada kisaran LSI 0,4-1,7 [22].

Beberapa metode yang selama ini telah diterapkan untuk mengatasi permasalahan *scaling* di industri antara lain pretreatment air umpan, pengaturan kondisi proses, dan *cleaning* [9, 49].

### 1. Pretreatment air umpan

Metode pretreatment air umpan meliputi: treatment temperatur, pengaturan pH, penambahan *complexing agent* (EDTA, dll), klorinasi, adsorpsi dengan karbon aktif, klarifikasi, dll.

Penambahan *antiscalant* merupakan salah satu dari bentuk pretreatment air umpan. Cara kerja *antiscalant* dalam mencegah terjadinya proses *scaling* adalah dengan menginterfensi proses pembentukan kristal saat fase pertumbuhan kristal seperti yang terlihat pada Gambar 2.10. [50]. (1) *Threshold Effect*: menjadi inhibitor yang dapat mencegah presipitasi garam yang kelarutannya telah melampaui hasil kali kelarutannya ( $K_{sp}$ ); (2) *Crystal Distortion Effect*: menginterfensi pembentukan kristal sehingga bentuk dan struktur kristal tidak beraturan sehingga menurunkan kemampuannya untuk membentuk kerak (*scale*); (3) *Dispersancy*: membentuk selaput bermuatan disekeliling kristal sehingga kristal saling menolak satu sama lain untuk bergabung.



Gambar 2.10. Mekanisme *antiscalant* dalam mencegah proses *scaling*

### 2. Kondisi proses

*Scaling* dapat diminimalisasi apabila polarisasi konsentrasi menurun. Polarisasi konsentrasi dapat diturunkan dengan cara meningkatkan koefisien perpindahan massa dan menurunkan fluks membran.



### 3. Cleaning

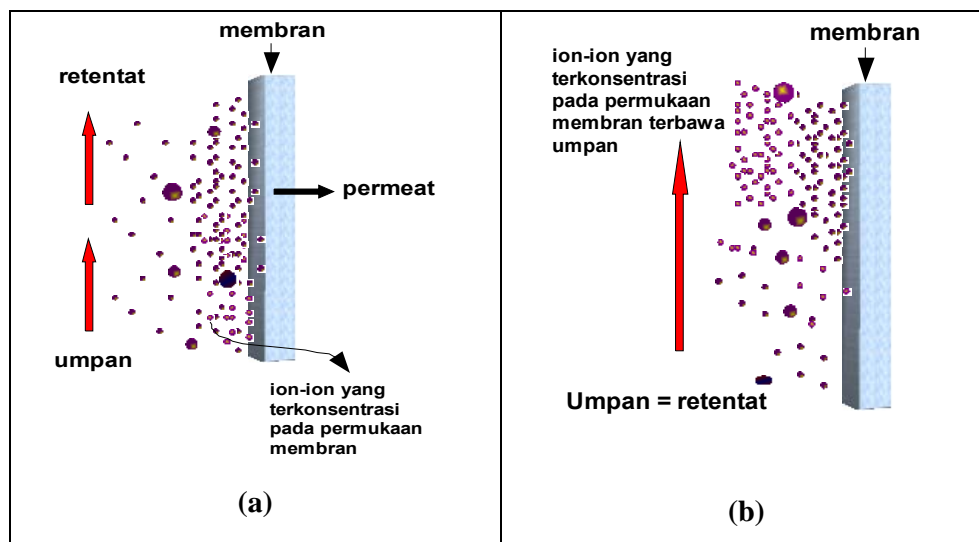
*Cleaning* merupakan proses yang paling praktis yang digunakan untuk mereduksi *scaling*. Terdapat beberapa metode *cleaning* antara lain: *hydraulic cleaning*, meliputi: *backward flushing* yang biasa digunakan pada sistem membran mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi, mengubah tekanan dan arah aliran pada frekuensi tertentu [9, 36], *air flushing* yang menggunakan campuran air dan udara [36], *vibrating membrane* [51] dan *forward flushing (autoflush)*. Metode yang akan diterapkan pada penelitian kali ini, yaitu *autoflush* juga termasuk metode *hydraulic cleaning*. Selain *hydraulic cleaning*, metode *mechanical cleaning*, merupakan metode yang hanya dapat digunakan pada sistem tubular dengan menggunakan *oversized sponge balls*. *Chemical cleaning* adalah metode *cleaning* yang paling banyak digunakan untuk meminimalisasi *scaling* di hampir semua industri yang menggunakan membran. Poin penting dalam mengaplikasikan metode ini adalah pemilihan bahan kimia yang akan digunakan dan waktu *cleaning* itu sendiri. Beberapa bahan kimia yang biasa digunakan adalah sebagai berikut: asam seperti asam kuat  $H_3PO_4$  atau asam lemah asam sitrat, basa seperti NaOH, detergen, *complexing agent* seperti EDTA, *polyacrylates*, dll. *Electric Cleaning* adalah metode yang sangat spesial. Cara kerjanya yaitu menambahkan bidang listrik pada membran sehingga partikel yang semula menempel pada membran akan berpindah ke bidang listrik tersebut. Metode ini dapat dilakukan tanpa menghentikan proses membran. Kelemahan dari metode ini adalah kebutuhan akan membran khusus dan module khusus yang dilengkapi elektroda [9].

#### 2.3.6 Metode *Autoflush*

Metode *autoflush* adalah metode *hydraulic cleaning* yang berbasis pada penurunan tekanan operasi selama beberapa waktu pada saat operasi pemisahan berlangsung. Pada waktu tersebut konsentrasi zat terlarut yang terakumulasi pada permukaan membran terbawa atau terbilas oleh umpan yang

mengalir dan polarisasi konsentrasi dapat dikontrol sebagaimana yang terlihat pada Gambar 2.11. karena saat tekanan dihentikan tidak akan ada aliran produk (permeat) [36]. Metode ini tidak dapat digunakan pada membran RO bertekanan operasi besar (40-60bar), karena penurunan dan peningkatan tekanan secara tiba-tiba dapat menyebabkan kerusakan pada modul membran.

Seperti yang telah disebutkan pada bab sebelumnya, beberapa penelitian yang mempelajari tentang *autoflush*, antara lain penelitian tentang aspek-aspek yang mempengaruhi proses *autoflush* [34] dan keefektifan permeat untuk proses *flushing* [35]. Selain itu, beberapa penemuan berkaitan dengan metode *autoflush* yang lebih banyak berfokus pada desain sistem peralatannya seperti paten metode *autoflush* dengan pipa *by-pass* pada alat kontrol laju alir konsentratnya [33]; metode *autoflush* dengan air dingin [37] dan metode *autoflush* yang dikontrol secara hidrostatik dengan tekanan osmosis [38]. Sedangkan keberhasilan metode ini secara kuantitatif dalam menghambat terjadinya *scaling* dan hubungannya dengan karakteristik umpan belum banyak diteliti.



Gambar 2.11. Konsep metode *autoflush* pada operasi membran. (a) kondisi saat operasi membran; (b) kondisi saat sistem di *autoflush*

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi metode *autoflush*, yaitu durasi dan interval [34].

1. Waktu (Durasi)

Waktu (durasi) adalah lama metode *autoflush* diterapkan. Durasi optimum adalah waktu yang dibutuhkan untuk menghilangkan seluruh lapisan kerak yang berada pada permukaan membran [35].

2. Interval

Interval, yaitu jarak waktu antara perlakuan *autoflush* yang pertama dan yang selanjutnya. Interval sangat berpengaruh pada fluks permeat [35]. Semakin panjang interval atau proses pemisahan dilakukan maka penurunan fluks permeat akan semakin signifikan.

Penelitian yang dikembangkan oleh Chen, mempelajari keefektifan *hydraulic cleaning* pada proses pengendalian *scaling* membran RO dengan umpan air limbah domestik. Pada riset tersebut digunakan kombinasi proses *autoflush* dan *backward flush* dengan variabel waktu (durasi) (1-5 menit) dan interval (2-6 jam). Kesimpulan yang didapat bahwa untuk membran RO pada sistem pengolahan air limbah domestik dengan umpan berupa keluaran dari UF adalah durasi optimum 1 min dalam interval 6 jam operasi.

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Bahan yang Digunakan

Pada penelitian ini digunakan larutan model yang mengandung kalsium bikarbonat. Larutan tersebut dibuat dengan mencampurkan 1L air RO dan bahan-bahan kimia berupa  $\text{CaCl}_2$  dan  $\text{NaHCO}_3$  sesuai Tabel 3.1. Bahan-bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari *Merck*.

Tabel 3.1. Konsentrasi larutan model

No. Var.	$\text{CaCl}_2$ (ppm)	$\text{NaHCO}_3$ (ppm)	TDS (ppm)	LSI	Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH
1	150	227	254	0	29-30 $^{\circ}\text{C}$	7,5
2	200	302	408	0,31	29-30 $^{\circ}\text{C}$	7,5
3	260	393	566	0,8	29-30 $^{\circ}\text{C}$	7,9
4	400	605	893	1,2	29-30 $^{\circ}\text{C}$	7,9
5	800	1210	1290	1,5	29-30 $^{\circ}\text{C}$	7,7

Sebelum digunakan, larutan model dianalisis untuk mengetahui kandungan Ca menggunakan metode titrasi substitusi EDTA. Selain itu, pada larutan model juga dilakukan pengukuran pH menggunakan pH meter dan pengukuran TDS (*total dissolved solid*) menggunakan TDS meter.

#### 3.2. Rancangan Penelitian dan Rangkaian Alat

##### Rancangan Penelitian

Percobaan dirancang dalam dua model. Rancangan pertama yaitu sistem RO yang dioperasikan dengan nilai LSI yang berbeda tanpa menggunakan *autoflush* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.2. Fluks permeat pada setiap proses diamati untuk mengetahui perilaku penurunannya yang menandai terjadinya *scaling*.

Tabel 3.2. Rancangan Penelitian Sistem Tanpa *Autoflush*

No.	LSI	Perlakuan Tanpa <i>Autoflush</i>
1	0	√
2	0,31	√
3	0,8	√
4	1,2	√
5	1,5	√

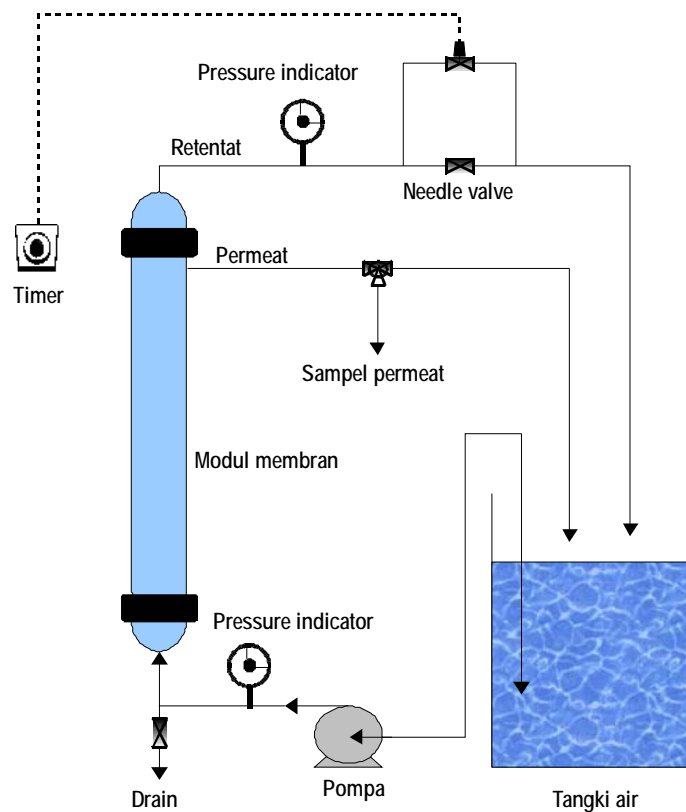
Rancangan kedua yaitu sistem RO yang dioperasikan dengan menggunakan metode *autoflush*. Percobaan ini dilaksanakan untuk mendapatkan pengaruh parameter *autoflush* (interval dan waktu (durasi)) terhadap proses *scaling* dan mencari hubungan antara karakteristik air umpan (LSI) dengan parameter *autoflush*. Pada penelitian ini dua parameter tersebut dirancang seperti ditunjukkan Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Rancangan Penelitian Sistem dengan *Autoflush*

Waktu /durasi (detik)	Interval (menit)	Nilai LSI			
		0,31	0,8	1,2	1,5
15	5	√	√	√	√
	10	√	√	√	√
	15	√	√	√	√
	20	√	√	√	√
	25	√	√	√	√
	30	√	√	√	√
30	60	√	√	√	√
	5	√	√	√	√
	10	√	√	√	√
	15	√	√	√	√
	20	√	√	√	√
	25	√	√	√	√
60	30	√	√	√	√
	60	√	√	√	√
	5	√	√	√	√
	10	√	√	√	√
	15	√	√	√	√
	20	√	√	√	√
	25	√	√	√	√
	30	√	√	√	√
	60	√	√	√	√

### Rangkaian Alat

Rangkaian alat yang akan digunakan pada penelitian ini terlihat pada Gambar 3.1. Rangkaian alat terdiri dari satu unit membran *spiral wound* jenis CSM RE-1812LP yang dilengkapi dengan pompa, dan tangki untuk menampung air umpan serta pengukur waktu (*timer*) sebagai *autoflush controller* yang diatur secara otomatis sesuai dengan variabel penelitian.

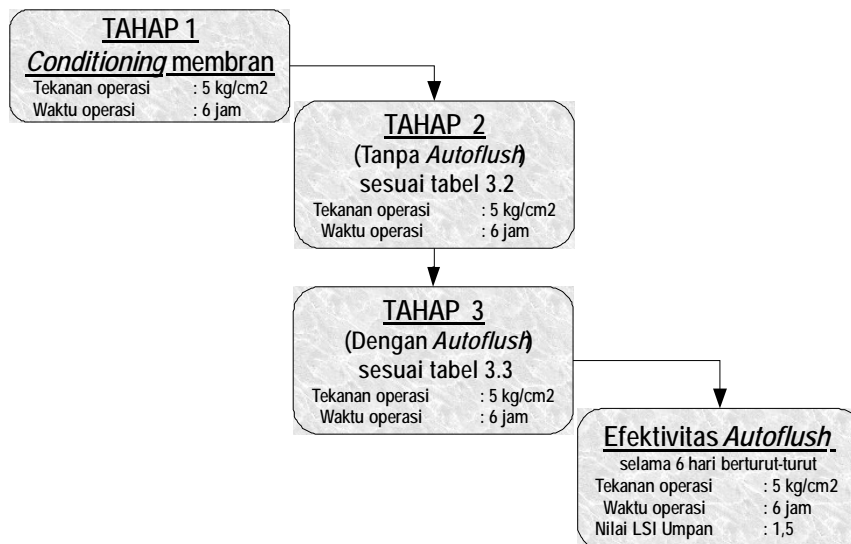


Gambar 3.1. Rangkaian alat

### **3.3. Prosedur Penelitian**

Prosedur penelitian terlihat pada Gambar 3.2. Penelitian diawali dengan *conditioning* membran. *Conditioning* pada membran terutama membran baru sangat perlu dilakukan untuk menstabilkan aliran fluks permeat. Kestabilan dapat dicapai dengan cara mengoperasikan membran RO dengan umpan air yang

memiliki TDS 2-5ppm dan mensirkulasikannya selama  $\pm 6$  jam pada tekanan operasi  $5 \text{ kg/cm}^2$ . Setiap 15 menit sampel permeat diambil menggunakan gelas ukur untuk penghitungan laju alirnya. Tahap kedua adalah operasi membran RO tanpa *autoflush*. Sistem disirkulasikan selama  $\pm 6$  jam pada tekanan operasi  $5 \text{ kg/cm}^2$  dengan air umpan yang memiliki nilai LSI sesuai dengan Tabel 3.2. Setiap 20 menit sampel permeat diambil menggunakan gelas ukur untuk penghitungan laju alirnya. Tahap ketiga adalah operasi membran RO dengan *autoflush*. Metode *autoflush* diterapkan dengan cara mengatur *timer* sesuai dengan variabel *autoflush* yang telah ditentukan (Tabel 3.3). Sistem disirkulasikan selama  $\pm 6$  jam pada tekanan operasi  $5 \text{ kg/cm}^2$  dengan air umpan yang memiliki nilai LSI sesuai dengan Tabel 3.3. Setiap 20 menit sampel permeat diambil menggunakan gelas ukur untuk penghitungan laju alirnya. Tahap keempat adalah penelitian untuk mengetahui keefektifan metode *autoflush*. Tahap ini sama dengan tahap ketiga yaitu mengoperasikan membran RO dengan air umpan  $\text{LSI} = 1,5$  selama  $\pm 6$  jam pada tekanan operasi  $5 \text{ kg/cm}^2$ . Setiap 20 menit sampel permeat diambil menggunakan gelas ukur untuk penghitungan laju alirnya. Tahap keempat dilakukan selama 6 hari berturut-turut dengan parameter *autoflush* optimum yang didapatkan pada penelitian tahap ketiga.



Gambar 3.2. Diagram alir penelitian

### 3.4. Metode Analisis

Dalam penelitian ini digunakan beberapa metode analisis sesuai dengan output data yang dibutuhkan yaitu:

1. Fluks permeat diukur dengan cara menampung air yang mengalir dalam gelas ukur dengan volume tertentu, pada saat yang sama waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan volume tersebut dicatat sehingga fluks dapat dihitung dengan persamaan:

$$Fluks = \frac{V}{A \times t} \dots\dots\dots(3.1)$$

dengan, V = volume permeat, A = luas membran 0,5m<sup>2</sup> dan t = waktu

2. SEM-EDS

Gambar mikro dan analisa kimia terhadap kerak (*scale*) yang terbentuk pada permukaan membran dilakukan dengan menggunakan instrumen *analytical scanning electron microscope* (SEM) JEOL JSM 6063 yang berhubungan dengan *energy dispersive X-ray spectrometer* (EDS) Oxford Instruments Link ISIS 200. Tujuan dari analisa menggunakan instrumen SEM adalah untuk melihat lebih jelas keberadaan kerak (*scale*) pada permukaan membran. Sedangkan, tujuan analisa menggunakan EDS adalah untuk menentukan elemen-elemen yang terkandung dalam kerak dan membran.

Membran yang mengalami *scaling* dipisahkan dari modul dan dikeringkan pada temperatur kamar selama 24 jam. Setelah itu, membran dipotong sesuai dengan ukuran yang diperlukan. Spesimen membran kemudian dilapisi oleh karbon sehingga spesimen bisa lebih rata dan konduktif.

### 3.5. Interpretasi Data

Interpretasi data yang digunakan adalah dalam bentuk grafik dan Tabel.



## **BAB IV**

### **HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

Secara umum, bab ini akan membahas pengaruh metode *autoflush* terhadap fluks permeat yang dilihat dengan membandingkan fluks permeat yang dihasilkan tanpa menggunakan *autoflush* dan dengan metode *autoflush*. Pembahasan pertama mengenai pengaruh nilai LSI terhadap penurunan fluks permeat pada operasi membran RO tanpa *autoflush*. Pembahasan kedua dan ketiga mengenai pengaruh interval dan waktu (durasi) terhadap kestabilan fluks permeat pada operasi membran dengan *autoflush*. Pembahasan keempat mengenai interval optimum ditinjau dari % air yang terbuang. Pembahasan kelima dan keenam mengenai hubungan antara interval dengan nilai LSI dan efektifitas *autoflush* pada membran RO skala rumah tangga.

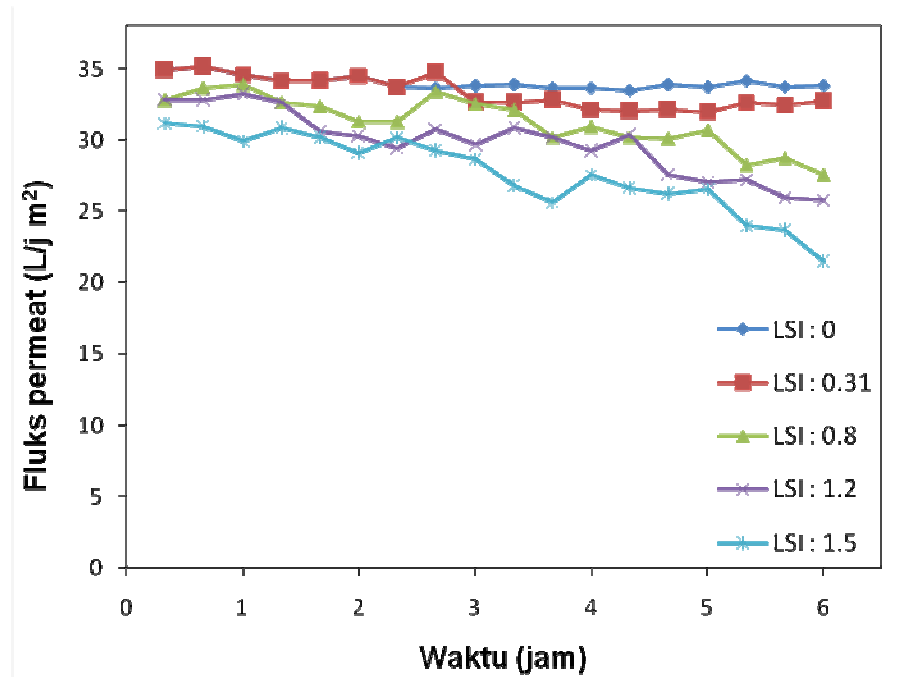
#### **4.1. Pengaruh Nilai LSI terhadap Fluks Permeat pada Sistem Tanpa *Autoflush***

Gambar 4.1. menunjukkan bahwa air umpan yang memiliki nilai LSI = 0 mengalami tren fluks yang relatif stabil terhadap waktu. Hal yang sama terlihat pada air umpan yang memiliki nilai LSI = 0,31. Penurunan fluks permeat yang terjadi pada variasi nilai LSI tersebut selama operasi berlangsung hanya berkisar 3-6%. Penurunan fluks yang tidak signifikan berkisar 5-8% lebih dikarenakan oleh proses *membrane conditioning* (kompaksi dll) yang masih terjadi [22].

Gambar 4.1. juga memperlihatkan adanya penurunan fluks permeat pada air umpan yang memiliki nilai LSI 0,8; 1,2 dan 1,5. Fluks permeat air umpan LSI 0,8 mengalami penurunan sekitar 16%, begitu juga untuk LSI 1,2 dan 1,5 masing-masing mengalami penurunan 21,23%; 31,28% dari fluks awal.

Berdasarkan metode *Langelier Saturation Index* (LSI), air umpan yang memiliki nilai LSI positif menunjukkan adanya potensi *scaling*; sedangkan nilai yang mendekati nol merupakan keadaan netral yang memungkinkan adanya *scaling* apabila terdapat interferensi dari luar sistem [19, 43, 44]. Pada penelitian ini

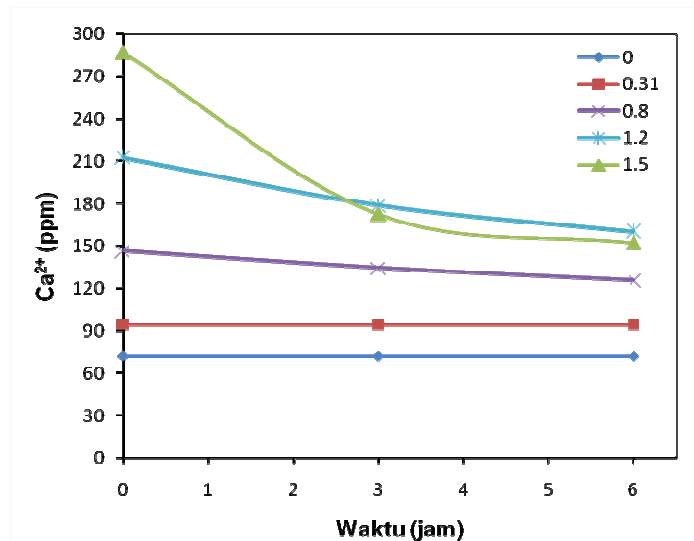
terlihat air umpan dengan nilai LSI 0,8 s/d 1,5 mengalami penurunan fluks permeat yang signifikan.



Gambar 4.1. Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO tanpa *autoflush* dengan nilai LSI yang bervariasi.

Kecenderungan ini menunjukkan bahwa fenomena *scaling* pada permukaan membran RO pertama kali terjadi pada air umpan yang memiliki kisaran nilai LSI 0,31-0,8. Hal yang serupa dinyatakan oleh Tzotzi pada penelitian tentang *scaling* pada membran RO dan NF, bahwa *scale* (kerak) pertama kali terbentuk saat larutan *bulk* mencapai rasio supersaturasi 2,5 (LSI = 0,8) atau rasio supersaturasi pada permukaan membran mencapai nilai 4 (LSI = 1,1) [22].

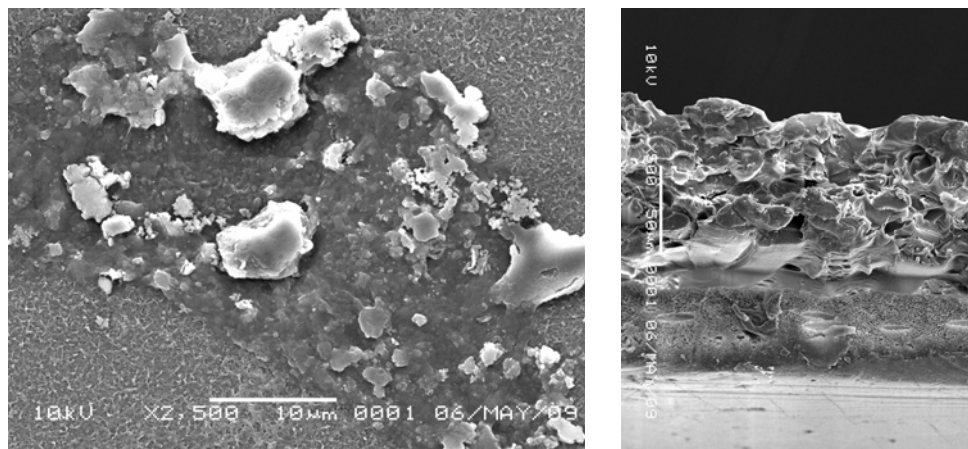
Selain itu, data pengamatan konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  selama proses menunjukkan kecenderungan yang sama. Gambar 4.2 memperlihatkan nilai konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  pada awal, tengah, dan akhir proses. Pada air umpan yang memiliki nilai LSI 0 dan 0,31, tidak terjadi perubahan kandungan  $\text{Ca}^{2+}$  pada umpan selama 6 jam operasi. Keadaan ini berkebalikan dengan air umpan yang memiliki nilai LSI 0,8; 1,2; 1,5. Pada air umpan tersebut terjadi penurunan konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  berkisar antara 14% sampai dengan 46% dari konsentrasi awal.



Gambar 4.2. Grafik konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  vs waktu pengamatan pada operasi membran RO tanpa *autoflush* dengan nilai LSI yang bervariasi.

Penurunan konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  pada air umpan ini mengindikasikan bahwa ion tersebut terpolarisasi pada permukaan membran, kemudian mengalami proses *scaling* dan menutupi permukaan membran, sehingga menyebabkan luas permukaan membran berkurang dan berdampak pada penurunan fluks permeat.

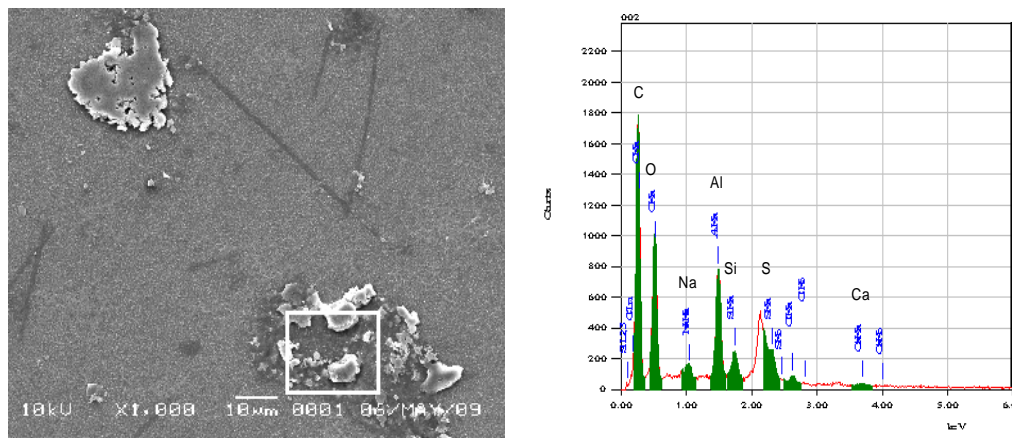
Terjadinya *scaling* juga dapat dilihat dari hasil analisa permukaan membran menggunakan instrumen *scanning electron microscope* (SEM). Gambar 4.3 menunjukkan kerak atau *scale* dengan bentuk lapisan dan deposit pada permukaan membran dilihat secara vertikal dan horizontal.



Gambar 4.3. Hasil analisa SEM pada permukaan membran setelah operasi membran RO tanpa *autoflush*

Lapisan cake yang terbentuk pada permukaan membran merupakan hasil dari mekanisme *scaling* kristalisasi homogen atau kristalisasi *bulk*, yaitu kristal terbentuk pada sedimen larutan *bulk* dipermukaan membran yang menyebabkan terjadinya penurunan fluks [24].

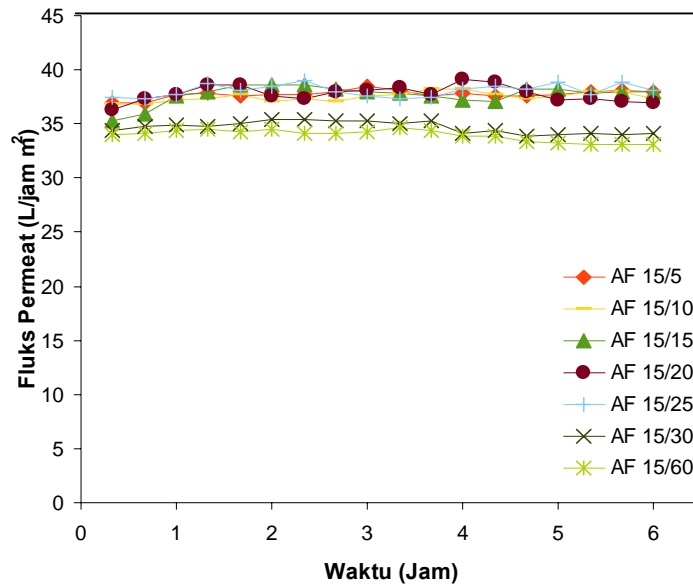
Kandungan kerak yang terdapat dipermukaan membran dianalisa dengan menggunakan *energy dispersive X-ray spectrometer* (EDS). Gambar 4.4 menunjukkan kerak yang terbentuk dipermukaan membran dan hasil analisa EDS pada zona tersebut. Terdapat peak Ca yang menunjukkan adanya kerak berupa kalsium karbonat pada permukaan membran.



Gambar 4.4. Hasil analisa EDS pada permukaan membran setelah operasi membran RO tanpa *autoflush*

#### 4.2. Pengaruh Interval terhadap Fluks Permeat pada Sistem dengan *Autoflush*

Data dari penelitian tahap kedua seperti pada Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan bahwa *scaling* mulai terbentuk di permukaan membran pada LSI 0,8-1,5. Pembahasan penelitian tahap ketiga yaitu pengaplikasian metode *autoflush* yang digunakan untuk mengendalikan *scaling* dan menjaga kestabilan fluks lebih difokuskan pada nilai LSI 0,8; 1,2; 1,5. Pengamatan terhadap keefektifan metode *autoflush* dalam menstabilkan kinerja membran dilakukan dengan mengamati kecenderungan fluks permeat dan keberadaan ion  $\text{Ca}^{2+}$  pada air umpan.



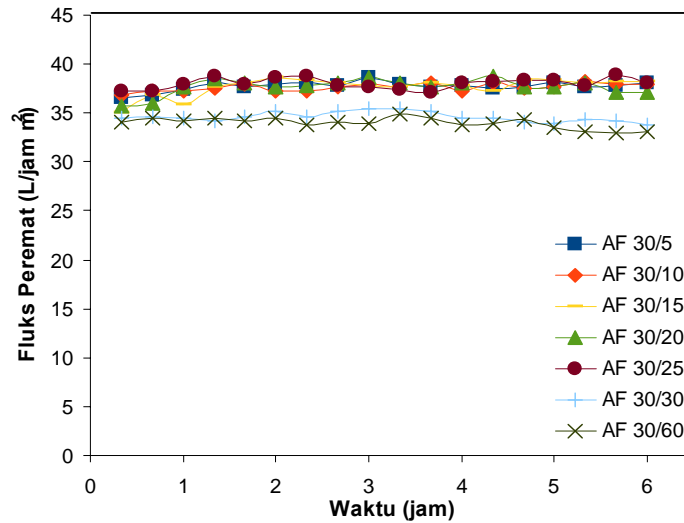
Gambar 4.5. Grafik laju alir permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI = 0,8 dengan waktu (durasi) *autoflush* 15 detik dan variasi interval 5-60 menit.

Keterangan :

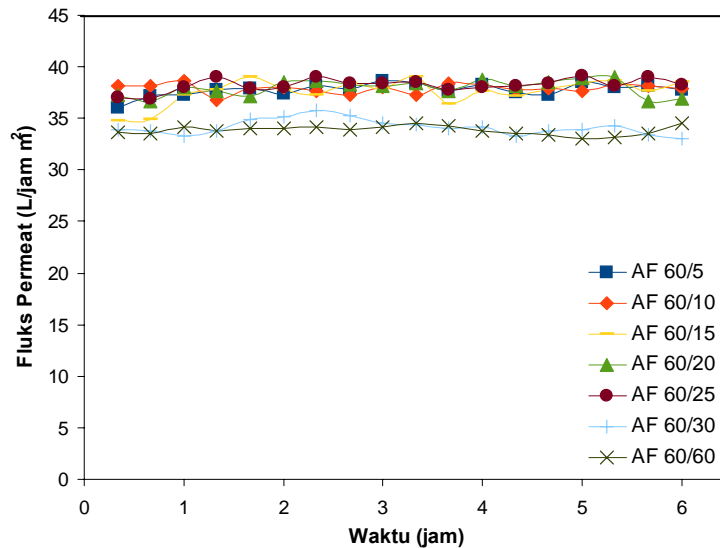
AF = kombinasi *autoflush* (waktu atau durasi (detik))/(interval (menit))

Pada Gambar 4.5. dapat dilihat kecenderungan fluks permeat pada sistem RO air umpan LSI = 0,8 dengan variasi interval 5-60 menit dan waktu (durasi) 15 detik. Fluks permeat pada interval 5-25 menit cenderung stabil dengan kisaran 37-38 L/jam m<sup>2</sup> sedangkan fluks permeat pada interval 30 dan 60 menit cenderung turun walaupun tidak signifikan dan berada pada kisaran 34-35 L/jam m<sup>2</sup>. Fenomena yang sama terjadi pada sistem RO air umpan LSI = 0,8 dengan variasi interval 5-60 menit dan waktu (durasi) 30 detik dan 60 detik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 dan 4.7.

Pada Gambar 4.6. dan 4.7 kecenderungan fluks permeat pada interval 5-25 menit relatif stabil dengan kisaran 37-38 L/jam m<sup>2</sup> sedangkan fluks permeat pada interval 30 dan 60 menit mengalami penurunan walaupun tidak signifikan dan berada pada kisaran 34-35 L/jam m<sup>2</sup>.



Gambar 4.6. Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI = 0,8 dengan waktu (durasi) *autoflush* 30 detik dan variasi interval 5-60 menit.

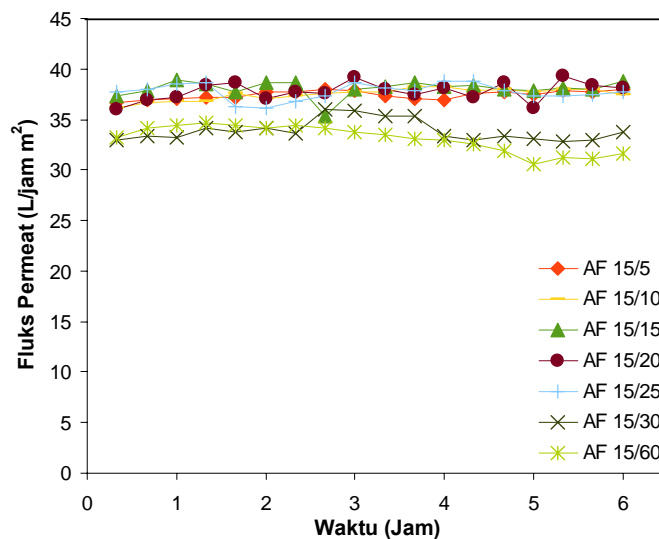


Gambar 4.7. Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI = 0,8 dengan waktu (durasi) *autoflush* 60 detik dan variasi interval 5-60 menit.

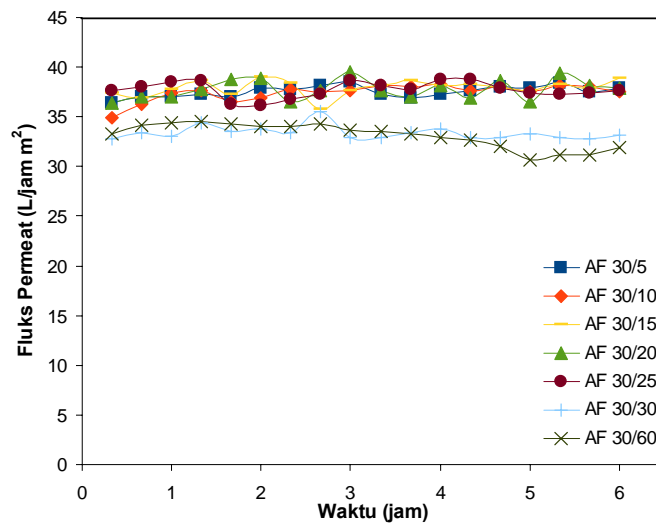
Pada sistem yang menggunakan air umpan dengan nilai LSI 0,8 konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  yang teramati mulai menurun pada interval 30 menit. Persentase penurunan konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  pada air umpan mencapai 10% dari konsentrasi awal. Hal ini menunjukkan bahwa pada interval 30 menit, metode *autoflush* tidak lagi dapat menstabilkan fluks dan kinerja membran dengan mendepolarisasi

konsentrasi ion dipermukaan membran. Fenomena ini mungkin dapat dihubungkan dengan laju polarisasi konsentrasi ion-ion saat proses pemurnian air berlangsung atau *induction time* dari pembentukan kristal kalsium karbonat yang tidak melebihi 30 menit. Sehingga saat interval *autoflush* mencapai waktu tersebut, proses *scaling* yang diawali dengan polarisasi konsentrasi telah terjadi. Namun, hubungan-hubungan tersebut masih perlu diteliti lebih lanjut.

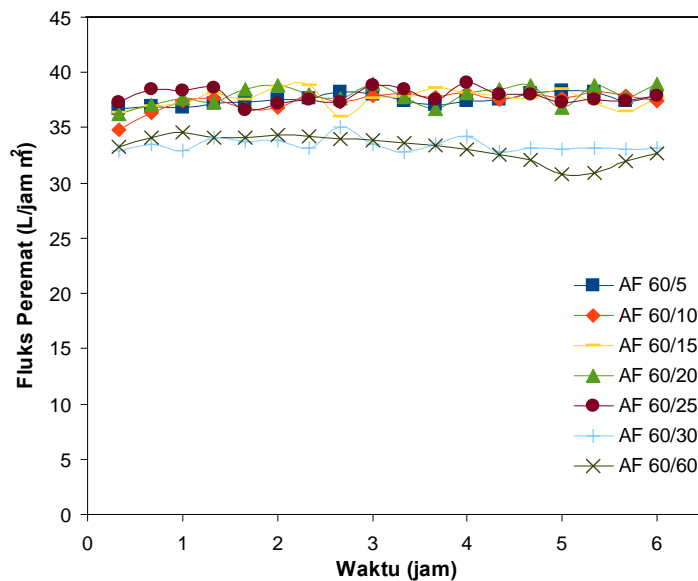
Kecenderungan fluks permeat pada sistem membran RO air umpan LSI 1,2 dengan variasi interval 5-60 menit dan variasi waktu (durasi) 15-60 detik dapat dilihat pada Gambar 4.8., 4.9. dan 4.10. Seperti kecenderungan yang ditunjukkan pada sistem dengan nilai LSI 0,8, kestabilan fluks permeat didapat pada interval 5-25 menit dengan kisaran 37-38 L/jam m<sup>2</sup> sedangkan fluks permeat pada interval 30 dan 60 menit dengan durasi 15-60 detik cenderung turun walaupun tidak signifikan dan berada pada kisaran 34-35 L/jam m<sup>2</sup>.



Gambar 4.8. Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI = 1,2 dengan waktu (durasi) *autoflush* 15 detik dan variasi interval 5-60 menit.



Gambar 4.9. Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI = 1,2 dengan waktu (durasi) *autoflush* 30 detik dan variasi interval 5-60 menit.



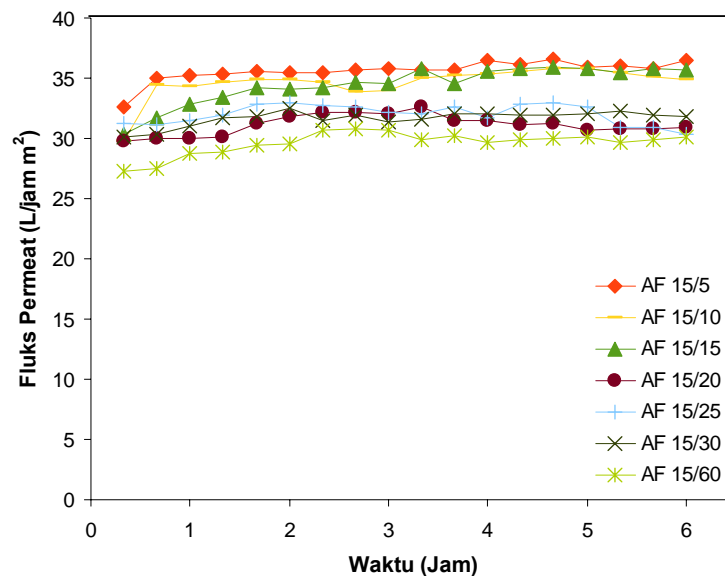
Gambar 4.10. Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI = 1,2 dengan waktu (durasi) *autoflush* 60 detik dan variasi interval 5-60 menit.

Kecenderungan fluks permeat yang telah dijelaskan diatas, juga dapat dijelaskan lebih lanjut apabila ditinjau dari keberadaan ion  $\text{Ca}^{2+}$  dalam air umpan selama proses. Pada operasi membran RO yang mengaplikasikan metode *autoflush* dengan interval 5 menit, konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  tetap stabil baik pada awal, tengah dan akhir proses. Konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  mulai menurun pada interval 30 menit.

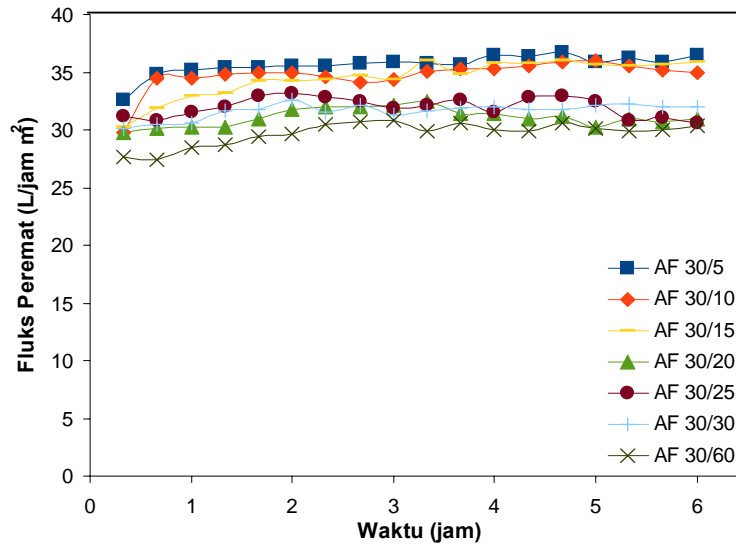


Fenomena ini sama dengan sistem dengan air umpan LSI 0,8, akan tetapi persentase penurunannya lebih besar yaitu mencapai 14%. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa pada interval 30 menit, metode *autoflush* tidak lagi dapat menstabilkan fluks. Fenomena ini mungkin dapat dijelaskan dengan laju polarisasi konsentrasi ion-ion saat proses pemurnian air berlangsung atau *induction time* dari pembentukan kristal kalsium karbonat yang tidak melebihi 30 menit.

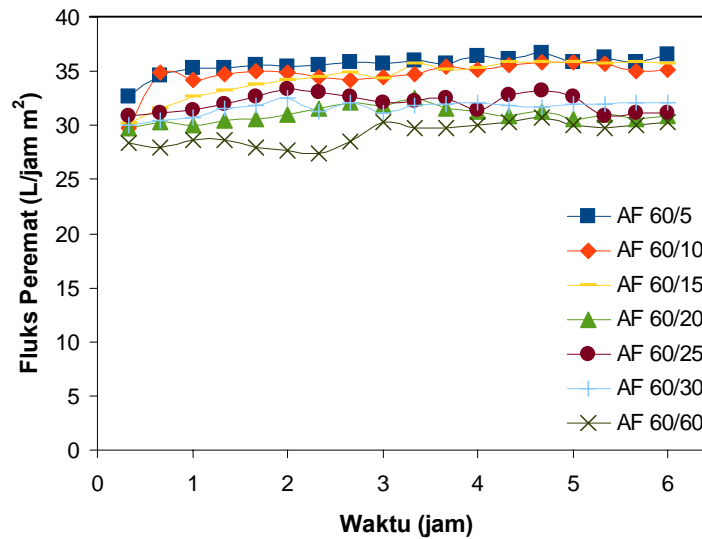
Pada Gambar 4.11. dapat dilihat kecenderungan fluks permeat terhadap waktu pengamatan pada sistem RO air umpan LSI = 1,5 dengan variasi interval 5-60 menit dan waktu (durasi) 15 detik. Interval (menit) 5-15 menit dapat menjaga fluks permeat tetap stabil dengan kisaran 35-36 L/jam m<sup>2</sup> dari fluks awal sedangkan interval 20-60 menit hanya mampu mencapai fluks permeat pada kisaran 29-30 L/jam m<sup>2</sup>. Kecenderungan yang sama terlihat pada fluks permeat sistem RO air umpan LSI = 1,5 dengan durasi *autoflush* 30 detik (Gambar 4.12) dan 60 detik (Gambar 4.13.).



Gambar 4.11. Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI = 1,5 dengan waktu (durasi) *autoflush* 15 detik dan variasi interval 5-60 menit.



Gambar 4.12. Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI = 1,5 dengan waktu (durasi) *autoflush* 30 detik dan variasi interval 5-60 menit.



Gambar 4.13. Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI = 1,5 dengan waktu (durasi) *autoflush* 60 detik dan variasi interval 5-60 menit.

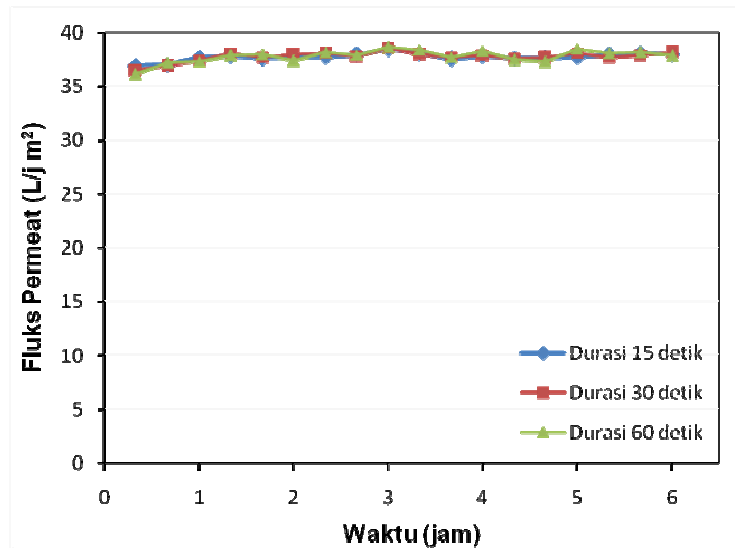
Pengamatan terhadap konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  pada awal dan akhir proses menunjukkan kecenderungan yang sama. Pada sistem yang mengaplikasikan metode *autoflush* dengan interval 5 menit, konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  tidak berubah dari

awal sampai akhir proses. Penurunan mulai terjadi pada interval 15 menit, dengan persentase penurunan mencapai 19%. Hal ini menunjukkan bahwa, selain pengaruh dari laju polarisasi konsentrasi ion dipermukaan membran dan *induction time* dari kalsium karbonat, karakteristik umpan dalam hal ini nilai LSI juga dimungkinkan berpengaruh terhadap interval yang baik digunakan untuk menjaga kinerja dari membran RO skala rumah tangga.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk menjaga kestabilan fluks permeat pada sistem dengan potensi *scaling* tertentu, dibutuhkan interval *autoflush* tertentu pula. Seperti umpan dengan nilai LSI 0,8 dan 1,2 akan memiliki kestabilan fluks apabila metode *autoflush* diaplikasikan pada sistem dengan interval 5 s/d 25 menit. Hal ini sejalan dengan pernyataan bahwa interval sangat berpengaruh pada fluks permeat. Semakin panjang interval atau proses pemisahan dilakukan maka penurunan fluks permeat akan semakin signifikan [35]. Pada umpan dengan nilai LSI 1,5 lebih direkomendasikan menggunakan interval 5 - 15 menit karena pada interval 20-60 menit, fluks permeat mengalami penurunan.

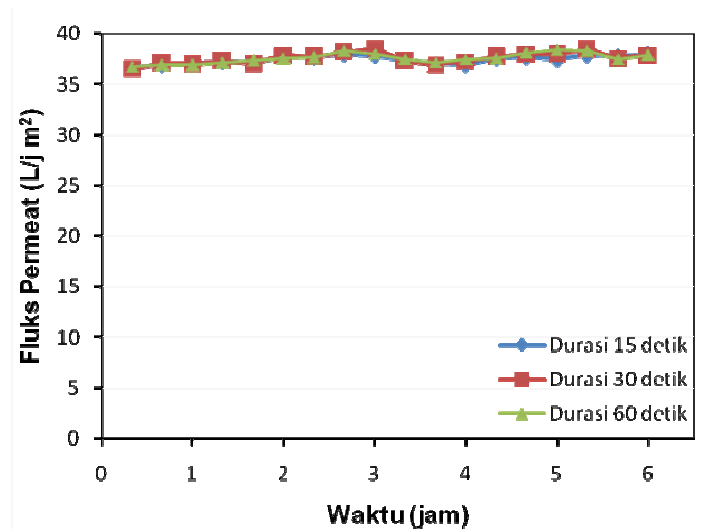
#### **4.3. Pengaruh Waktu (durasi) terhadap Fluks Permeat pada Sistem dengan *Autoflush***

Waktu (durasi) adalah lamanya proses *autoflush* berlangsung. Pada sistem dengan nilai  $LSI = 0,8$ ; pengaruh waktu (durasi) terhadap fluks permeat dapat dilihat pada Gambar 4.14. Pada operasi membran RO menggunakan air umpan  $LSI = 0,8$  dengan interval *autoflush* 5 menit, fluks permeat berkisar antara 37-38 L/jam  $m^2$  pada waktu (durasi) 15, 30 dan 60 detik. Fenomena ini terjadi pada semua variasi interval.



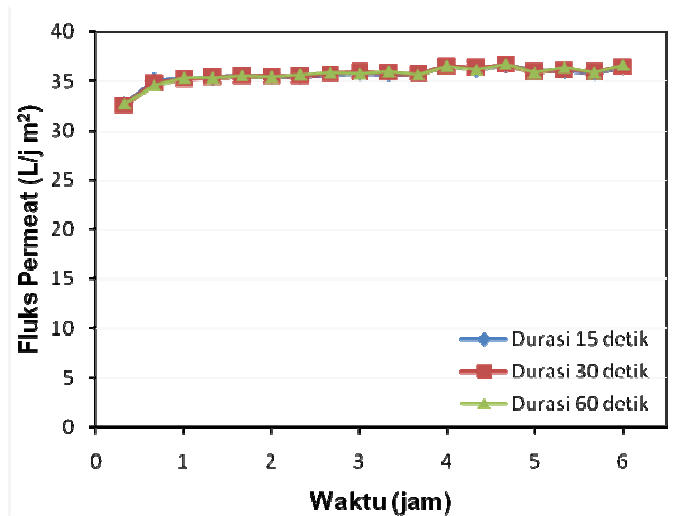
Gambar 4.14. Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI = 0,8 dengan interval *autoflush* 5 menit dan variasi waktu (durasi) 15-60 detik.

Pada nilai LSI = 1,2 dengan interval *autoflush* 5 menit, fluks permeat berada pada kisaran 37-38 L/jam m<sup>2</sup> pada waktu (durasi) 15, 30, dan 60 detik pengaruh waktu (durasi) terhadap fluks permeat dapat dilihat pada Gambar 4.15. Fluks permeat pada waktu (durasi) 15, 30, dan 60 detik cenderung stabil pada kisaran 37-38 L/jam m<sup>2</sup>.



Gambar 4.15. Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI = 1,2 dengan interval *autoflush* 5 menit dan variasi waktu (durasi) 15-60 detik.

Pada sistem dengan nilai LSI 1,5 dengan interval *autoflush* 5 menit dan variasi waktu (durasi) 15 detik, fluks permeat berkisar antara 35-36 L/jam m<sup>2</sup> sama dengan fluks permeat pada waktu (durasi) 30 dan 60 detik seperti yang terlihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16. Grafik fluks permeat vs waktu pengamatan pada operasi membran RO menggunakan air umpan LSI = 1,5 dengan interval *autoflush* 5 menit dan variasi waktu (durasi) 15-60 detik.

Pada penelitian ini, proses *autoflush* yang berfungsi untuk mendepolarisasi konsentrasi dipermukaan membran. Selain itu, proses *autoflush* juga berfungsi untuk menggantikan seluruh larutan konsentrat yang dapat memicu terbentuknya kerak (*scale*) pada membran dengan larutan air umpan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses ini dapat terselesaikan dalam waktu 15 detik atau waktu (durasi) minimal yang ditentukan. Dapat dinyatakan pula secara spesifik, pada penelitian ini penambahan waktu (durasi) menjadi 30 detik dan 60 detik belum menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kinerja membran.

#### 4.4. Hubungan Interval dengan Nilai LSI Air Umpan

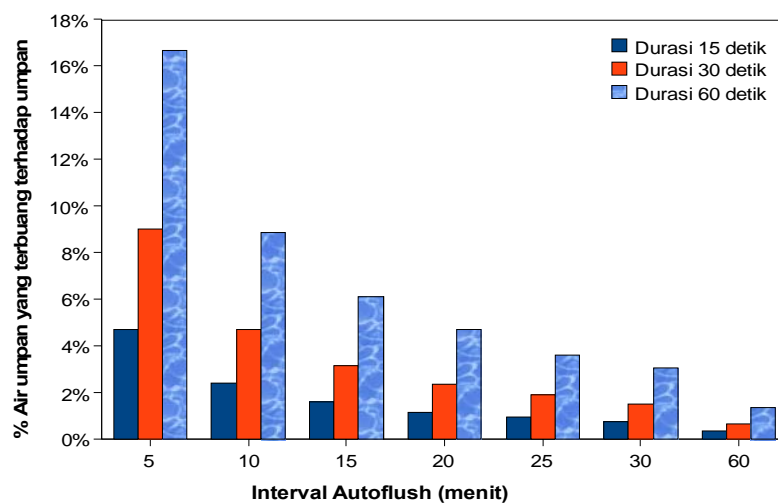
Pada pembahasan bab 4.2, diketahui bahwa interval mempengaruhi kestabilan fluks. Sistem dengan nilai LSI 0,8 dan 1,2 mencapai kestabilan fluks pada interval 5-25 menit. Sedangkan, kestabilan fluks untuk sistem dengan nilai

LSI 1,5 dicapai pada interval 5-15 menit. Secara ekonomi interval *autoflush* tersebut perlu ditinjau dari jumlah air umpan yang terbangung pada saat proses *autoflush* sehingga dapat diketahui interval *autoflush* yang optimum dan ekonomis bagi suatu sistem tertentu.

Selama waktu operasi  $\pm 6$  jam dapat dihitung persentase air umpan terbangung yang digunakan untuk proses *autoflush* terhadap jumlah permeat yang dihasilkan. Hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.17. Pada gambar tersebut terlihat bahwa persentase air umpan yang terbangung merupakan fungsi dari waktu (durasi) dan interval. Semakin panjang (waktu) durasi proses maka persentase air yang terbangung akan semakin besar, dan semakin panjang interval antara proses maka persentase air yang terbangung semakin kecil.

Tabel 4.1 Waktu total *autoflush* selama 6 jam proses (jam)

Interval (menit)	Waktu total <i>autoflush</i> selama 6 jam proses (jam)		
	waktu (durasi)	waktu (durasi)	waktu (durasi)
	15 detik	30 detik	60 detik
5	0,28	0,54	1,71
10	0,15	0,28	0,53
15	0,095	0,19	0,36
20	0,07	0,14	0,28
25	0,058	0,11	0,22
30	0,046	0,09	0,18
60	0,0208	0,04	0,08



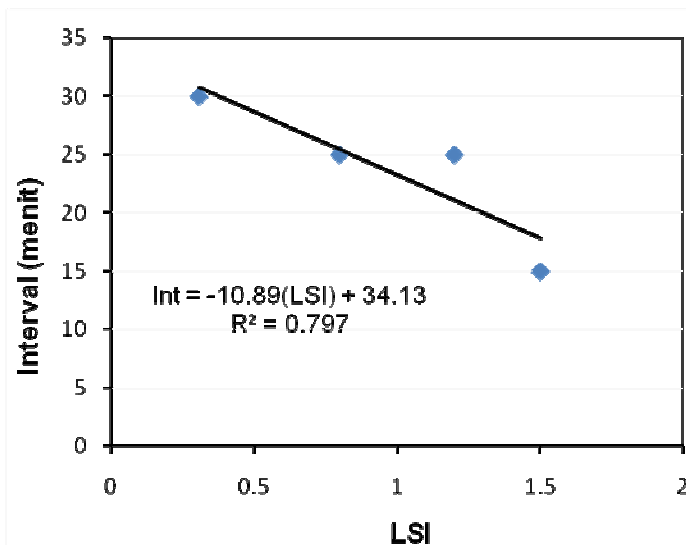
Gambar 4.17. Grafik % air yang terbangung vs interval *autoflush* pada waktu (durasi) 15; 30; 60 detik

Setelah ditinjau dari segi jumlah air umpan yang terbuang pada saat proses *autoflush* dapat diketahui interval *autoflush* yang optimum dan ekonomis bagi suatu sistem dengan nilai LSI tertentu pada kondisi operasi yang sama seperti yang dirangkum dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Interval optimum untuk nilai LSI tertentu

LSI	interval optimum (menit)
0.31	30
0.8	25
1.2	25
1.5	15

Salah satu tujuan dari penelitian ini adalah mencari hubungan antara interval dengan karakteristik air umpan yang ditunjukkan dengan nilai LSI pada sistem membran RO skala rumah tangga. Hubungan antara karakteristik air umpan yang ditunjukkan dengan nilai LSI dengan interval dapat digambarkan pada grafik seperti yang terlihat pada Gambar 4.18, yang dikhususkan pada sistem membran RO skala rumah tangga dengan tekanan operasi 5 kg/cm<sup>2</sup>.



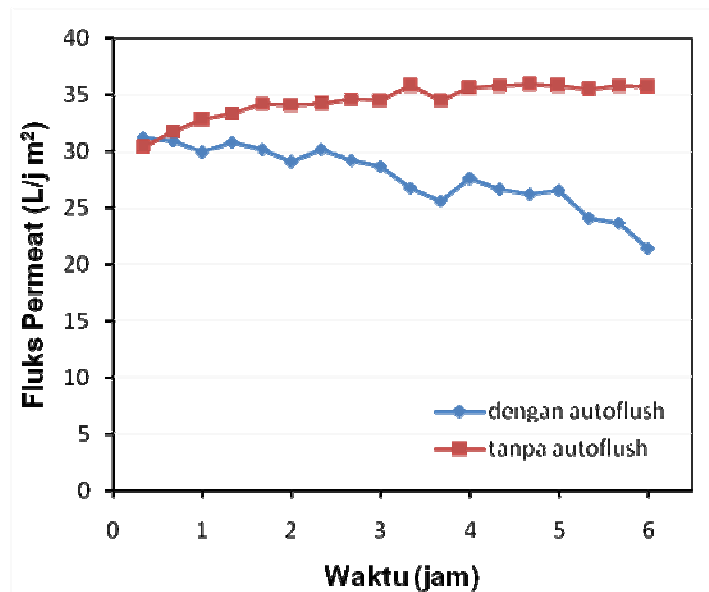
Gambar 4.18. Grafik hubungan interval dengan nilai LSI umpan pada sistem membran RO tekanan operasi 5 kg/cm<sup>2</sup>

Hubungan ini digambarkan linier karena sebuah hipotesis, bahwa pada suatu nilai LSI tertentu, metode *autoflush* tidak dapat digunakan untuk menjaga kestabilan fluks. Namun, penelitian ini belum mendapatkan nilai LSI kritis

tersebut. Persamaan interval (Int) =  $(-10,899 \times \text{LSI}) + 34,132$  dapat digunakan untuk mencari interval optimum yang akan diterapkan pada suatu sistem membran RO dengan kisaran LSI 0-1,5 tekanan operasi  $5 \text{ kg/cm}^2$ .

#### 4.5. Pengaruh dengan dan Tanpa Metode *Autoflush* terhadap Fluks Permeat

Pengaruh dengan dan tanpa metode *autoflush* terhadap fluks permeat dapat dilihat pada Gambar 4.19. Gambar tersebut menunjukkan efektifitas *autoflush* kombinasi durasi (detik) dan interval (menit) 15/15 dalam menjaga kestabilan fluks pada sistem membran RO dengan air umpan yang memiliki nilai LSI 1,5. Fluks yang stabil dapat dicapai pada membran RO apabila metode *autoflush* diterapkan pada sistem. Selain menstabilkan fluks, produktivitas membran juga meningkat hingga 14,8% pada sistem membran yang dijalankan dengan protokol kombinasi *physical cleaning* yang dikemukakannya [35].



Gambar 4.19. Grafik pengaruh dengan metode *autoflush* 15/15 dan tanpa metode *autoflush* terhadap fluks permeat pada sistem membran RO air umpan LSI = 1,5

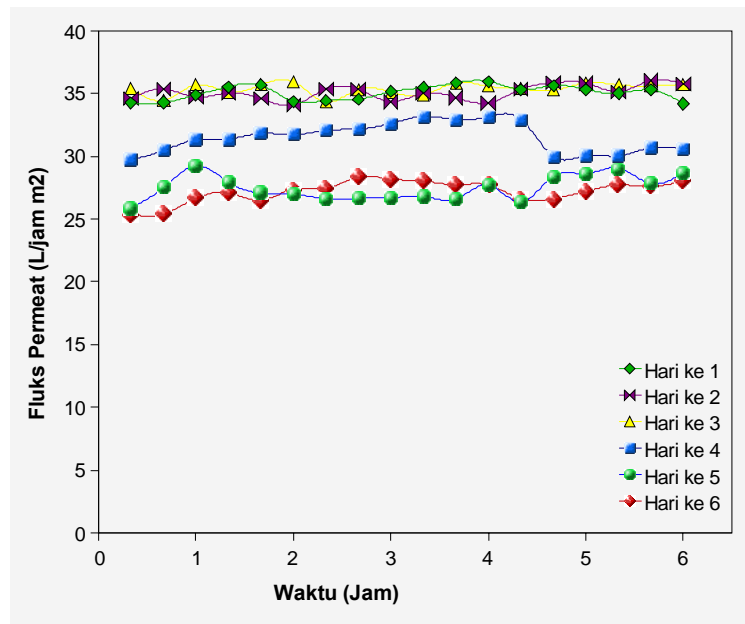
Pada operasi membran RO skala rumah tangga, rasio antara jumlah permeat dan *drain* (konsentrat yang terbuang) maksimal 1:1 [52]. Hal ini menunjukkan bahwa sistem membran RO yang digunakan pada penelitian ini yang memiliki laju alir umpan 1L/menit mampu menghasilkan 500ml



permeat/menit dengan membuang konsentrat sebanyak 500ml/menit. Apabila metode *autoflush* diaplikasikan pada sistem dengan kombinasi durasi/interval 15/15 selama 6 jam maka air yang terbuang akibat pengaplikasian metode *autoflush* adalah 7,9 ml/menit. Penambahan nilai ini pada jumlah air yang terbuang akibat proses pemisahan itu sendiri tidak signifikan. Sehingga dapat dinyatakan bahwa pengaplikasian metode *autoflush* tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap jumlah air yang terbuang dan tidak merugikan secara ekonomi.

#### 4.6. Efektifitas *Autoflush* dalam Aplikasi Membran RO Skala Rumah Tangga

Penelitian ini juga mengamati efektifitas *autoflush*, apabila dipasang pada sistem membran RO skala rumah tangga. Penelitian ini dilakukan selama 6 hari berturut-turut dan setiap harinya membran RO dengan air umpan LSI 1,5 dioperasikan pada tekanan operasi  $5 \text{ kg/cm}^2$  dan kisaran waktu operasi  $\pm 6$  jam. Hasil penelitiannya ditunjukkan pada gambar 4.20. Pada grafik dapat dilihat bahwa kestabilan fluks terjadi sampai hari ketiga berkisar antara  $35 \text{ L/jam m}^2$ .



Gambar 4.20. Grafik efektifitas metode *autoflush* pada sistem membran RO tekanan dan waktu operasi  $5 \text{ kg/cm}^2$  dan 6 jam

Penggunaan membran RO skala rumah tangga untuk memenuhi kebutuhan air bersih dengan jumlah 3-6 kemasan galon/hari hanya berkisar 1-2 jam perhari. Sedangkan kondisi operasi yang digunakan pada penelitian ini merupakan kondisi ekstrim (6 jam), sehingga dapat dinyatakan bahwa metode *autoflush* dapat digunakan pada sistem membran RO sebagai salah satu metode untuk meminimalisasi pembentukan *scaling* dengan mendepolarisasi konsentrasi pada permukaan membran [34]. Selain itu, pada dasarnya *physical cleaning* seperti *autoflush* tidak dapat mencegah adsorpsi zat terlarut ke permukaan membran yang menyebabkan meningkatnya resistensi pada membran dan salah satu penyebab *scaling* [9].

## **BAB V**

### **HASIL KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

*Scaling* yang diakibatkan oleh  $\text{CaCO}_3$  dalam air umpan pada sistem membran RO skala rumah tangga telah dipelajari dengan mengamati perubahan fluks permeat yang terjadi selama proses pada nilai LSI 0-1,5. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa proses *scaling* pertama kali terjadi pada air umpan yang memiliki kisaran nilai LSI 0,31-0,8. Penurunan fluks yang merupakan salah satu parameter fenomena *scaling* terjadi secara signifikan (16-31%) pada air umpan yang memiliki nilai LSI 0,8-1,5. Pengamatan terhadap konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  pada air umpan juga mulai menunjukkan penurunan pada nilai LSI 0,8. Hal ini mengindikasikan bahwa ion tersebut terpolarisasi pada permukaan membran, kemudian mengalami proses *scaling* sehingga menyebabkan luas permukaan membran berkurang dan berdampak pada penurunan fluks permeat.

Penelitian ini juga mempelajari metode *autoflush* sebagai cara untuk mengendalikan *scaling*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter *autoflush* yaitu interval, dapat memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap stabilitas fluks permeat. Persamaan interval ( $\text{Int}$ ) =  $(-10,899 \times \text{LSI}) + 34,132$  dapat digunakan untuk mencari interval optimum yang akan diterapkan pada suatu sistem membran RO tekanan operasi  $5 \text{ kg/cm}^2$ , pada kisaran LSI 0,31-1,5. Waktu (durasi) minimum yang ditetapkan yaitu 15 detik, telah dapat menstabilkan kinerja membran dan penambahan waktu (durasi) menjadi 30 dan 60 detik tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kinerja membran.

Secara umum metode *autoflush* dapat digunakan pada sistem membran RO skala rumah tangga sebagai salah satu metode mengendalikan *scaling* dengan mendepolarisasi konsentrasi zat terlarut pada permukaan membran.

## **5.2 Saran**

Penelitian ini dapat menjadi dasar dari penelitian lanjutan dimasa depan. Terdapat banyak hal yang bisa dikembangkan dari penelitian tentang pengendalian *scaling* dengan metode *autoflush*. Mulai dari pengembangan variasi waktu operasi, tekanan operasi, kandungan air umpan, kombinasinya dengan proses *cleaning* lainnya dapat diteliti lebih lanjut. Efektifitas *autoflush* ditinjau dari resistensi total membran serta efektifitas *autoflush* apabila dihadapkan pada sistem dengan kandungan ion kompleks.

## BAB VI

### RINGKASAN

Permasalahan ketersediaan air minum yang memiliki kualitas baik telah terselesaikan dengan dikembangkannya teknologi membran RO skala rumah tangga. Namun, permasalahan lain kembali muncul yaitu bagaimana mengatasi kelemahan membran RO berupa *scaling*, yang secara signifikan dapat dapat mengurangi fluks pada permeat (produk), rejeksi garam-garam yang terkandung pada umpan, kerusakan membran dan memperpendek umur membran. Salah satu solusi yang dikembangkan terutama untuk mengatasi *scaling* oleh  $\text{CaCO}_3$  pada membran RO skala rumah tangga adalah metode *autoflush*. Secara umum, teori tentang membran RO skala rumah tangga, *scaling*, dan bagaimana mengatasi *scaling* dengan kelemahannya serta metode *autoflush* dijelaskan pada bab 1 dan bab 2.

Sebagai salah satu metode yang digunakan untuk mengendalikan *scaling* dan meningkatkan kinerja membran RO, keefektifan metode *autoflush* perlu diteliti lebih lanjut terutama pengaruh parameter *autoflush* yaitu interval dan waktu (durasi) dan hubungan antara interval dan (waktu) durasi *autoflush* terhadap karakteristik air umpan yaitu nilai *Langelier Saturation Index* (LSI). Metodologi penelitian yang digunakan untuk meneliti lebih lanjut keefektifan metode *autoflush*, yaitu bahan, alat, prosedur dan metode analisa dijelaskan lebih rinci pada bab 3.

Pengamatan terhadap *scaling* yang diakibatkan oleh  $\text{CaCO}_3$  dalam air umpan pada sistem membran RO skala rumah tangga telah dibahas pada bab 4. Secara umum pada bab tersebut dijelaskan bahwa proses *scaling* pertama kali terjadi pada air umpan yang memiliki kisaran nilai LSI 0,31-0,8. Hal ini didukung oleh data penurunan fluks yang terjadi secara signifikan (16-31%) dan penurunan konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  pada air umpan pada nilai LSI 0,8. Hal ini juga mengindikasikan bahwa ion tersebut terpolarisasi pada permukaan membran, kemudian mengalami proses *scaling* sehingga menyebabkan luas permukaan membran berkurang dan berdampak pada penurunan fluks permeat. Selain itu, pada bab 4 juga dijelaskan bahwa parameter *autoflush* yaitu interval, dapat memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap stabilitas fluks permeat dan waktu (durasi) minimum yang ditetapkan yaitu 15 detik, telah dapat menstabilkan kinerja membran dan penambahan waktu (durasi) menjadi 30 dan 60 detik tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kinerja membran.

Kesimpulan bahwa secara umum metode *autoflush* dapat digunakan pada sistem membran RO skala rumah tangga sebagai salah satu metode mengendalikan *scaling* dengan mendepolarisasi konsentrasi zat terlarut pada permukaan membran; dan saran tentang bagaimana penelitian lanjutan sebaiknya dilaksanakan dijelaskan pada bab 5.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Effendi, H., 2003, *Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan.*, Edisi ketiga, Yogyakarta, Kanisius, 11, 44-49.
- [2] Anonym, 2008, *Water Resources.*, [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com), 19 November 2008 10:00am
- [3] Daigger, G.T., 2008, *New Approaches and Technologies for Wastewater Management.*, National Academy of Engineering Publications Vol. 38 No.3, [www.nae.com](http://www.nae.com), 22 November 2008 10:00 am.
- [4] Singh, R., 2006, *Hybrid Membrane Systems for Water Purification: Technology Systems Design and Operations.*, Elsevier Science & Technology Books, 1-3, 87-88.
- [5] Tay, K.G., Song, L., 2005, "A More Effective Method for Fouling Characterization in a Full Scale Reverse osmosis Process.", *Desalination*, Vol 177, 95-107.
- [6] Wang, Y., 2005. *Composite Fouling of Calcium Sulfate and Calcium Carbonate in Dynamic Seawater Reverse osmosis Unit.* School of Chemical Engineering and Industrial Chemistry. University of New South Wales.
- [7] Fisher, A., Reisig, J., Powell, P., Walker, M., 2007, *Reverse osmosis (R/O): How it Works.*, University of Nevada.
- [8] [www.HomeWaterPurifiersAndFilters.com](http://www.HomeWaterPurifiersAndFilters.com) , *Reverse osmosis (RO) Water Filters.*, 1-06-2009: 10:00am.
- [9] Mulder, M., 1996, *Basic Principles of Membrane Technology.* 2<sup>nd</sup> edition., London, Kluwer Academic Publishers, 6, 448, 416-418, 453-456.
- [10] Kamrin, M., Hayden, N., Christian, B., Bennack, D., D'Itri, F., 1999, *Reverse osmosis for Home Drinking Water.*, Bulletin WQ24, Michigan University.
- [11] Clemson Extension, 1990, *Home Water Treatment Systems.*, Bulletin of Water Quality, The Clemson University Cooperative Extension Service.
- [12] Gales, M.A., Magidson, S.I., Wistrand, J., Guy, D.B., 1988, *Reverse*

*osmosis Purifier.*, US Patent 4744895.

- [13] Birdsong, T.E., Mork, S.O., Peace, S.L., 1992, *Reverse osmosis System.*, US Patent 5132017.
- [14] Whittier, S., 1992, *High Flow Rate Reverse osmosis Water Filtration System for Home Use.*, US Patent 5078864.
- [15] Kuepper, T.A., 1996, *Zero Waste Effluent Desalination System.*, US Patent 5520816.
- [16] Klein, K.C., 1997, *Portable Reverse osmosis Water Purification Plant.*, US Patent 5632892.
- [17] Bowman, D.E., 1997, *Reject Water Drain Line Installation System and Apparatus for Under Sink Reverse osmosis Filter System.*, US Patent 5635058.
- [18] Chen, K.R., 1999, *Reverse osmosis Drinking Water Treatment System with Backwashable Precise Prefilter Unit.*, US Patent 5958232.
- [19] Mustofa, G.M., 2007, *The Study of Pretreatment Options for Composite Fouling of Reverse osmosis Membrane Used in Water Treatment and Production.* School of Chemical Science and Engineering. University of South Wales.
- [20] Song, L., Hu, J.Y., Ong, S.L., Ng, W.J., Elimelech, M., Wilf, M., 2003, "Performance Limitation of The Full-Scale Reverse osmosis Process.", *Journal of Membrane Science*, Vol 214, 239-244.
- [21] Gloede, M., Melin, T., 2007, "Physical Aspects of Membrane Scaling.", *Desalination*, Vol 224, 71-75.
- [22] Tzotzi, C., Pahiadaki, T., Yiantisios, S.G., Karabelas, A.J., Andritsos, N., 2007, "A Study of  $\text{CaCO}_3$  Scale Formation and Inhibition in RO and NF Membrane Processes.", *Desalination*, Vol 296, 171-184.
- [23] Chesters, S.P., 2009, "Innovations in the Inhibition and Cleaning of Reverse osmosis Membrane Scaling and Fouling.", *Desalination*, Vol 238, 22-29.
- [24] Oh, H.J., Choung, Y.K., Lee, S., Choi, J.S., Hwang, T.M., Kim, J.H., 2009, "Scale Formation in Reverse osmosis Desalination: Model Development.",

Desalination, Vol 238, 333-346.

- [25] Drak, A., Glucina, K., Busch, M., Hasson, D. Laîne, J.M., Semiat, R., 2000, "*Laboratory Technique for Predicting The Scaling Propensity of RO Feed Waters.*", Proceedings of the Conference on Membranes in Drinking and Industrial Water Production, Vol.2, 483-492.
- [26] Stamatakis, E., Stubos, A., Palyvoz, J., Chatzichristos, C., Muller, J., 2005, "*An Improved Predictive Correlation for The Induction time of  $\text{CaCO}_3$  Scale Formation during Flow in Porous Media.*", Journal of Colloid and Interface Science, Vol.286, 7-13.
- [27] Rahardianto, A., Shih, W.Y., Lee, R.W., Cohen, Y., 2006, "*Diagnostic Characterization Of Gypsum Scale Formation And Control In Ro Membrane Desalination Of Brackish Water.*", Journal of Membrane Science, Vol 279, 655–668.
- [28] Zeiher, E.H.K., Ho, B., William, K.D., 2003, "*Novel Antiscalant Dosing Control.*", Desalination, Vol 157, 299-316.
- [29] Sheikholeslami, R., Ong, H.W.K., 2003, "*Kinetics and Thermodynamics of Calcium Carbonate and Calcium Sulfate at Salinities up to 1.5 M.*", Desalination, Vol 157, 217-234.
- [30] Sagle, A., Freeman, B., 2004, *Fundamentals of Membranes for Water Treatment.*, University of Texas at Austin.
- [31] Lisitsin, D., Yang, Q., Hasson, D., Semiat, R., 2005, "*Inhibitor of  $\text{CaCO}_3$  Scaling on RO Membranes by Trace Amounts of Zinc Ions.*", Desalination, Vol 183, 289-300.
- [32] Yang, Q., 2006, "*Inhibitor of  $\text{CaCO}_3$  Scaling in Reverse osmosis System by Zinc Ion.*", Chinese Journal Chemical Engineering, Vol 14(2), 178-183.
- [33] Bray, D.T., 1976, *Reverse osmosis System with Automatic Flushing.*, US Patent 3959146.
- [34] Chen, J.P., Kim, S.L., Ting, Y.P., 2003, "*Optimization of Membrane Physical and Chemical Cleanig by a Statistically Designed Approach.*", Journal of Membrane Science, Vol 219, 27-45.
- [35] Shon, H.K., Smith, P.J., Vigneswaran, S., Ngo, H.H., 2007, "*Effect of a*



*Hydrodynamic Cleaning of a Cross-flow membrane System with a Novel Automated Approach.*”, Desalination, Vol 202, 351-360.

- [36] Anonym, 2008, *Membrane Cleaning Methods.*, [www.lentech.com](http://www.lentech.com), 12 November 2008, 10:00 am.
- [37] Mora, H.F., Ohara, R.J., Hills, A., 1992, *Compact Reverse osmosis System with Cold Water Flush.*, US Patent 5122265.
- [38] Schoenmeyr, I., 1997, *Hydrostically Driven Osmotic Membrane Flush System for a Reverse Osmotic Water Purification System.*, US Patent 5658457.
- [39] William, M.E., 2003, *A Brief Review of Reverse osmosis Membrane Technology.*, EET Corporation and Williams Engineering Services Company.
- [40] Technical Manual Filmtec: *Reverse osmosis Membranes.*, Dow Liquid Separations, 11-12.
- [41] [www.HomeWaterPurifiersAndFilters.com](http://www.HomeWaterPurifiersAndFilters.com) , *Residential Reverse osmosis Applications.*, 1-06-2009: 10:00am.
- [42] Cohen, Y., 2002, *Scale Formation Control.*, DRIP Workshop, Los Angeles, CA. [www.polysep.uncle.edu](http://www.polysep.uncle.edu). 28 November 2008 10:19am.
- [43] Edstrom Industries, 2003, *Scale-Forming Tendency of Water.*, Edstrom Industries, Inc. or [www.edstrom.com](http://www.edstrom.com) November 2008 10:31am.
- [44] Anonym, 2008, *Langlier Saturation Index and Carbonate Equilibrium.*, [www.lentech.com](http://www.lentech.com). 11 Maret 2009 10:00am.
- [45] Sheikholeslami, R., 2004, “*Assesment of The Scaling Potential for Sparingly Soluble Salts in RO and UF Units.*”, Desalination, Vol 167, 247-256.
- [46] Shon, H.K., Kim, S.H., Vigneswaran, S., Aim, R.B., Lee, S., Cho, J., 2009, “*Physicochemical Pretreatment of Seawater: Fouling Reduction and Membrane Characterization.*”, Desalination, Vol 238, 10-21.
- [47] Hanson, D., Drak, A., Semiat, R., 2003, “*Induction times Induced in an RO System by Antiscalant Delaying CaSO<sub>4</sub> Precipitation.*”, Desalination, Vol 157, 193-207.

- [48] Hamrouni, B., Dhahbi, M., 2001, "*Thermodynamic Description of Saline Waters-Prediction of Scaling Limits in Desalination Process.*", Desalination, Vol. 137, 275-284.
- [49] Lueck, S., 2000, *Membrane Cleaning.*, RODI Systems Corp. [www.rodusystems.com](http://www.rodusystems.com) , 28 November 2008 10:15am.
- [50] Darton, E. G., 2000, *Scale Inhibition Techniques Used in membrane Systems.* PermaCare USA, Inc.
- [51] Johnson, G., Culkin, B., Monroe, M., 2003, *Kinetics of Mineral Scale Membrane Fouling: A Comparison of Conventional Crossflow Membranes and V SEP, a Vibratory Membrane System.*, Technical Article from New Logic Research, Incorporated.
- [52] Anonym, 2004, *MoBetta Pro Series Water Store Skid.*, [www.mobettawater.com](http://www.mobettawater.com). 13 Maret 2009 10:00am.

## Lampiran 1

### 1. Titrasi substitusi untuk analisa Ca pada air umpan

Titration substitusi EDTA digunakan untuk menganalisa keberadaan Ca pada air umpan.

#### Bahan yang digunakan:

- Larutan KCN 10%
- Larutan KOH 8M
- Larutan Hydroxylamine
- Indikator HHSSNA
- Larutan standar EDTA (3,723gr EDTA + 1000ml aquades)
- Aquades

#### Prosedur:

- Ambil 5ml sampel, kemudian encerkan sampai 50ml dengan aquades
- Tambahkan 0,5ml KCN 10%, 0,5ml hydroxylamine, 2ml KOH 8M
- Aduk dan tambahkan indikator HHSSNA
- Titrasi dengan larutan standar EDTA sampai terjadi perubahan warna dari jingga menjadi warna biru terang.
- Catat kebutuhan titran.

$$\text{Ca (mg)} = \frac{V \text{ titran} \times 1 \times 400,8}{V \text{ sampel}}$$

Hasil analisis keberadaan Ca pada air umpan

No.	CaCl <sub>2</sub> (ppm)	NaHCO <sub>3</sub> (ppm)	TDS terukur (ppm)	V titran (ml)	Ca (ppm)
1	60	90	110	2,7	21,64
2	100	151	206	6,8	54,50
3	150	227	254	9	72,14
4	200	302	408	11,7	93,78
5	260	393	566	18.1	145,09
6	400	605	893	26,9	215,63
7	800	1210	1290	36	288,57

## 2. Perhitungan nilai LSI (*Langlier Saturation Index*)

*Langelier Saturation Index* (LSI) adalah metode yang digunakan untuk memprediksi stabilitas kalsium karbonat dalam air.

Persamaan:

$$LSI = pH - pHs \dots\dots\dots(2.14)$$

$$pHs = (9,3 + A + B) - (C + D) \dots\dots\dots(2.15)$$

dimana :

$$A = \frac{(\log_{10}[TDS] - 1)}{10}$$

$$B = -13,12 \times \log_{10}(T^{\circ}C + 273) + 34,55$$

$$C = \log_{10}[Ca^{2+}] - 0,4$$

$$D = \log_{10}[alkalinity]$$

Namun persamaan diatas terkoreksi akibat keberadaan nilai koefisien aktivitas, *ionic strength* dan muatan dari masing-masing ion yaitu  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^{-}$ ,  $H^{+}$  sehingga persamaan pHs menjadi:

$$pHs = -\log \left\{ \frac{K_a \gamma_{Ca^{2+}} [Ca^{2+}] \gamma_{HCO_3^{-}} [HCO_3^{-}]}{\gamma_{H^{+}} K_{sp}} \right\} \dots\dots\dots(2.16)$$

dengan,

$K_a$  = konstanta kesetimbangan karbonat/bikarbonat terhadap waktu

$$= 9,2 \cdot 10^{-13} T + 2,3 \cdot 10^{-11}$$

$$\gamma = \text{koefisien aktivitas} = 10^{\frac{0,5(Z_i)^2 \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}}}$$

$Z_i$  = muatan ion,  $Ca^{2+} = 2$ ,  $HCO_3^{-} = -1$ ,  $H^{+} = 1$

$I$  = *ionic strength* larutan dalam hal ini adalah air =  $2,5 \cdot 10^{-5}$  TDS

$K_{sp}$  = hasil kali kelarutan sebagai fungsi waktu

$$= 9,237 \cdot 10^{-9} e^{-0,0277T}$$

Hasil Perhitungan LSI pada variasi konsentrasi air umpan

No.	CaCl <sub>2</sub> (ppm)	NaHCO <sub>3</sub> (ppm)	TDS terukur (ppm)	Temp (°C)	pH	Ca <sup>2+</sup> (M)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (M)	Ksp CaCO <sub>3</sub>
1	60	90	110	28	7.1	5,94E-04	1,07E-03	6,37E-07
2	100	151	206	28	7.6	9,90E-04	1,80E-03	1,78E-06
3	150	227	254	29	7.5	1,49E-03	2,70E-03	4,01E-06
4	200	302	408	30	7.5	1,98E-03	3,60E-03	7,12E-06
5	260	393	566	29	7.9	2,57E-03	4,68E-03	1,20E-05
6	400	605	893	30	7.9	3,96E-03	7,20E-03	2,85E-05
7	800	1210	1290	30	7.7	7,92E-03	1,44E-02	1,14E-04

No.	Ionic Strength	$\gamma(\text{Ca}^{2+})$	$\gamma(\text{HCO}_3^-)$	Ka	Ksp (fT)	pHs	LSI
1	0,0028	0,79	0,58	4,88E-11	4,25E-09	-8.24	-1,11
2	0,0052	0,73	0,59	4,88E-11	4,25E-09	-7.82	-0,25
3	0,0064	0,71	0,59	4,97E-11	4,14E-09	-7.46	0,00
4	0,0102	0,66	0,60	5,06E-11	4,02E-09	-7.23	0,31
5	0,0142	0,61	0,60	4,97E-11	4,14E-09	-7.05	0,80
6	0,0223	0,55	0,61	5,06E-11	4,02E-09	-6.71	1,22
7	0,0503	0,43	0,63	5,06E-11	4,02E-09	-6.15	1,51

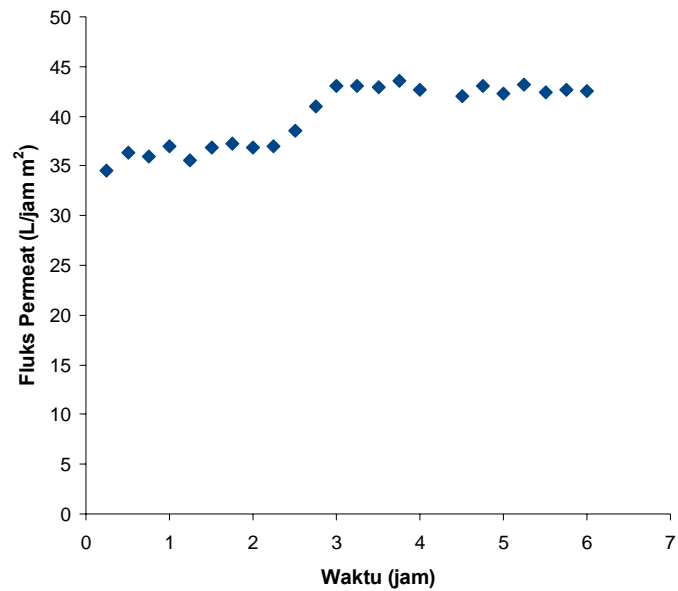
*Lampiran 2*

## HASIL PERCOBAAN

### 1. *Membrane Conditioning*

Tekanan : 5 kg/cm<sup>2</sup>  
Umpan : Air RO  
Waktu operasi : 6 jam

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks Permeat (L/jam m <sup>2</sup> )
0,25	50	10,43	17,26	34,52
0,50	50	9,89	18,20	36,40
0,75	50	10,01	17,98	35,96
1,00	50	9,74	18,48	36,96
1,25	50	10,12	17,79	35,57
1,50	50	9,77	18,42	36,85
1,75	50	9,68	18,60	37,19
2,00	50	9,76	18,44	36,89
2,25	50	9,73	18,50	37,00
2,50	50	9,34	19,27	38,54
2,75	50	8,78	20,50	41,00
3,00	50	8,36	21,53	43,06
3,25	50	8,37	21,51	43,01
3,50	50	8,39	21,45	42,91
3,75	50	8,27	21,77	43,53
4,00	50	8,44	21,33	42,65
4,50	50	8,58	20,98	41,96
4,75	50	8,36	21,53	43,06
5,00	50	8,52	21,13	42,25
5,25	50	8,34	21,58	43,17
5,50	50	8,49	21,20	42,40
5,75	50	8,43	21,35	42,70
6,00	50	8,47	21,25	42,50



**Grafik fluks permeat terhadap waktu pengamatan pada proses *membrane conditioning***

## 2. Konsentrasi $\text{Ca}^{2+}$ pada Operasi Membran Tanpa *Autoflush*

Waktu Pengamatan (jam)	LSI									
	0		0,31		0,8		1,2		1,5	
	ml	ppm	ml	ppm	ml	ppm	ml	ppm	ml	ppm
0	9	72,14	11,8	94,58	18,3	146,69	26,5	212,42	35,8	286,97
3	9	72,14	11,8	94,58	16,8	134,67	22,3	178,76	21,5	172,34
6	9	72,14	11,8	94,58	15,7	125,85	20	160,32	19	152,3

### 3. Fluks Permeat pada Sistem Tanpa *Autoflush* LSI = 0

Umpan	: 1 Liter	Waktu operasi	: 6 jam
	: $\text{CaCl}_2 = 200 \text{ mg}$	Tekanan	: $5 \text{ kg/cm}^2$
	: $\text{NaHCO}_3 = 300 \text{ mg}$	TDS permeat	: 10 ppm
TDS	: 254 ppm	Rejeksi	96,06%
$\text{Ca}^{2+}$	: 72,072 ppm	LSI	: 0
Alkalinitas	: 219,82 ppm		
pH	: 7,5		
Temp	: $29^\circ\text{C}$		

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks Permeat (L/jam $\text{m}^2$ )
0,33	50	10,32	17,44	34,88
0,67	50	10,25	17,56	35,12
1,00	50	10,41	17,29	34,58
1,33	50	10,54	17,08	34,16
1,67	50	10,55	17,06	34,12
2,00	50	10,43	17,26	34,52
2,33	50	10,67	16,87	33,74
2,67	50	10,69	16,84	33,68
3,00	50	10,65	16,90	33,80
3,33	50	10,63	16,93	33,87
3,67	50	10,71	16,81	33,61
4,00	50	10,69	16,84	33,68
4,33	50	10,75	16,74	33,49
4,67	50	10,63	16,93	33,87
5,00	50	10,68	16,85	33,71
5,33	50	10,54	17,08	34,16
5,67	50	10,67	16,87	33,74
6,00	50	10,65	16,90	33,80



#### 4. Fluks Permeat pada Sistem Tanpa *Autoflush* LSI = 0,31

Umpan	: 1 Liter	Waktu operasi	: 6 jam
	: $\text{CaCl}_2 = 260 \text{ mg}$	Tekanan	: $5 \text{ kg/cm}^2$
	: $\text{NaHCO}_3 = 393 \text{ mg}$	TDS permeat	: 13 ppm
TDS	: 408 ppm	Rejeksi	96,81%
$\text{Ca}^{2+}$	: 93,69 ppm	LSI	: 0,31
Alkalinitas	: 285,77 ppm		
pH	: 7,5		
Temp	: $30^\circ\text{C}$		

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks Permeat (L/jam $\text{m}^2$ )
0,33	50	10,32	17,44	34,88
0,67	50	10,25	17,56	35,12
1,00	50	10,41	17,29	34,58
1,33	50	10,54	17,08	34,16
1,67	50	10,55	17,06	34,12
2,00	50	10,43	17,26	34,52
2,33	50	10,67	16,87	33,74
2,67	50	10,37	17,36	34,72
3,00	50	11,04	16,30	32,61
3,33	50	11,04	16,30	32,61
3,67	50	10,98	16,39	32,79
4,00	50	11,2	16,07	32,14
4,33	50	11,25	16,00	32,00
4,67	50	11,21	16,06	32,11
5,00	50	11,27	15,97	31,94
5,33	50	11,02	16,33	32,67
5,67	50	11,09	16,23	32,46
6,00	50	11,01	16,35	32,70

### 5. Fluks Permeat pada Sistem Tanpa *Autoflush* LSI = 0,8

Umpan	: 1 Liter	Waktu operasi	: 6 jam
	: $\text{CaCl}_2 = 400 \text{ mg}$	Tekanan	: $5 \text{ kg/cm}^2$
	: $\text{NaHCO}_3 = 605 \text{ mg}$	TDS permeat	: 20 ppm
TDS	: 566 ppm	Rejeksi	96,99%
$\text{Ca}^{2+}$	: 144,14 ppm	LSI	: 0,8
Alkalinitas	: 439,64 ppm		
pH	: 7,9		
Temp	: $29^\circ\text{C}$		

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks Permeat (L/jam $\text{m}^2$ )
0,33	50	10,98	16,39	32,79
0,67	50	10,71	16,81	33,61
1,00	50	10,63	16,93	33,87
1,33	50	11,02	16,33	32,67
1,67	50	11,11	16,20	32,40
2,00	50	11,5	15,65	31,30
2,33	50	11,52	15,63	31,25
2,67	50	10,77	16,71	33,43
3,00	50	11,05	16,29	32,58
3,33	50	11,21	16,06	32,11
3,67	50	11,92	15,10	30,20
4,00	50	11,65	15,45	30,90
4,33	50	11,93	15,09	30,18
4,67	50	11,97	15,04	30,08
5,00	50	11,74	15,33	30,66
5,33	50	12,76	14,11	28,21
5,67	50	12,54	14,35	28,71
6,00	50	13,07	13,77	27,54

## 6. Fluks Permeat pada Sistem Tanpa *Autoflush* LSI = 1,2

Umpan	: 1 Liter	Waktu operasi	: 6 jam
	: $\text{CaCl}_2 = 600 \text{ mg}$	Tekanan	: $5 \text{ kg/cm}^2$
	: $\text{NaHCO}_3 = 905,1 \text{ mg}$	TDS permeat	: 26 ppm
TDS	: 893 ppm	Rejeksi	97,09%
$\text{Ca}^{2+}$	: 216,22 ppm		
Alkalinitas	: 659,46 ppm	<b>LSI</b>	<b>: 1,2</b>
pH	: 7,9		
Temp	: $30^\circ\text{C}$		

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks Permeat (L/jam $\text{m}^2$ )
0,33	50	10,98	16,39	32,79
0,67	50	10,99	16,38	32,76
1,00	50	10,85	16,59	33,18
1,33	50	11,02	16,33	32,67
1,67	50	11,76	15,31	30,61
2,00	50	11,9	15,13	30,25
2,33	50	12,23	14,72	29,44
2,67	50	11,69	15,40	30,80
3,00	50	12,14	14,83	29,65
3,33	50	11,67	15,42	30,85
3,67	50	11,92	15,10	30,20
4,00	50	12,31	14,62	29,24
4,33	50	11,87	15,16	30,33
4,67	50	13,05	13,79	27,59
5,00	50	13,3	13,53	27,07
5,33	50	13,21	13,63	27,25
5,67	50	13,87	12,98	25,96
6,00	50	13,94	12,91	25,82

### 7. Fluks Permeat pada Sistem Tanpa *Autoflush* LSI = 1,5

Umpan	: 1 Liter	Waktu operasi	: 6 jam
	: $\text{CaCl}_2 = 800 \text{ mg}$	Tekanan	: $5 \text{ kg/cm}^2$
	: $\text{NaHCO}_3 = 1210 \text{ mg}$	TDS permeat	: 29 ppm
TDS	: 1290 ppm	Rejeksi	97,75%
$\text{Ca}^{2+}$	: 288,29 ppm	LSI	: 1,5
Alkalinitas	: 879,28 ppm		
pH	: 7,7		
Temp	: $30^\circ\text{C}$		

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks Permeat (L/jam $\text{m}^2$ )
0,33	50	11,53	15,61	31,22
0,67	50	11,65	15,45	30,90
1,00	50	12,03	14,96	29,93
1,33	50	11,68	15,41	30,82
1,67	50	11,94	15,08	30,15
2,00	50	12,39	14,53	29,06
2,33	50	11,93	15,09	30,18
2,67	50	12,32	14,61	29,22
3,00	50	12,56	14,33	28,66
3,33	50	13,44	13,39	26,79
3,67	50	14,05	12,81	25,62
4,00	50	13,05	13,79	27,59
4,33	50	13,53	13,30	26,61
4,67	50	13,75	13,09	26,18
5,00	50	13,55	13,28	26,57
5,33	50	14,97	12,02	24,05
5,67	50	15,21	11,83	23,67
6,00	50	16,78	10,73	21,45

### 8. Fluks Permeat pada sistem LSI 0,31 dengan *Autoflush*

Umpan	: 1 Liter	Alkalinitas	: 285,77 ppm
	: $\text{CaCl}_2 = 260 \text{ mg}$	pH	: 7,5
	: $\text{NaHCO}_3 = 393 \text{ mg}$	Temp	: $29^\circ\text{C}$
TDS	: 408 ppm	Waktu operasi	: 6 jam
$\text{Ca}^{2+}$	: 93,69 ppm	Tekanan	: $5 \text{ kg/cm}^2$
		LSI	: 0,31

Pengamatan (jam)	Vol, (ml)	AF 15/5			AF 15/10			Waktu (detik)	
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam $\text{m}^2$ )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam $\text{m}^2$ )		
0,33	50	9,4	19,15	38,30	9,57	18,81	37,62	9,59	
0,67	50	9,38	19,19	38,38	9,26	19,44	38,88	9,46	
1,00	50	9,24	19,48	38,96	9,47	19,01	38,01	9,52	
1,33	50	9,29	19,38	38,75	9,39	19,17	38,34	9,47	
1,67	50	9,35	19,25	38,50	9,26	19,44	38,88	9,45	
2,00	50	9,33	19,29	38,59	9,25	19,46	38,92	9,39	
2,33	50	9,46	19,03	38,05	9,32	19,31	38,63	9,36	
2,67	50	9,45	19,05	38,10	9,31	19,33	38,67	9,41	
3,00	50	9,42	19,11	38,22	9,37	19,21	38,42	9,1	
3,33	50	9,31	19,33	38,67	9,53	18,89	37,78	9,16	
3,67	50	9,28	19,40	38,79	9,4	19,15	38,30	9,23	
4,00	50	9,16	19,65	39,30	9,42	19,11	38,22	9,24	
4,33	50	9,15	19,67	39,34	9,5	18,95	37,89	9,17	
4,67	50	9,11	19,76	39,52	9,46	19,03	38,05	9,17	
5,00	50	9,11	19,76	39,52	9,35	19,25	38,50	9,21	
5,33	50	9,05	19,89	39,78	9,13	19,72	39,43	9,18	
5,67	50	9,15	19,67	39,34	9,13	19,72	39,43	9,25	
6,00	50	9,19	19,59	39,17	9,21	19,54	39,09	9,19	

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	AF 15/25			AF 15/30			W (d
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam $\text{m}^2$ )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam $\text{m}^2$ )	
0,33	50	9,57	18,81	37,62	10,17	17,70	35,40	10
0,67	50	9,61	18,73	37,46	9,63	18,69	37,38	10
1,00	50	9,54	18,87	37,74	9,43	19,09	38,18	10
1,33	50	9,26	19,44	38,88	9,42	19,11	38,22	10
1,67	50	9,21	19,54	39,09	9,34	19,27	38,54	10

2,00	50	9,26	19,44	38,88	9,29	19,38	38,75	10
2,33	50	9,25	19,46	38,92	9,21	19,54	39,09	10
2,67	50	9,25	19,46	38,92	9,18	19,61	39,22	10
3,00	50	9,17	19,63	39,26	9,35	19,25	38,50	10
3,33	50	9,14	19,69	39,39	9,31	19,33	38,67	10
3,67	50	9,11	19,76	39,52	9,33	19,29	38,59	10
4,00	50	9,2	19,57	39,13	9,55	18,85	37,70	10
4,33	50	9,29	19,38	38,75	9,25	19,46	38,92	10
4,67	50	9,42	19,11	38,22	9,27	19,42	38,83	10
5,00	50	9,36	19,23	38,46	9,06	19,87	39,74	10
5,33	50	9,26	19,44	38,88	9,18	19,61	39,22	10
5,67	50	9,25	19,46	38,92	9,17	19,63	39,26	10
6,00	50	9,35	19,25	38,50	9,17	19,63	39,26	10

### 9. Fluks Permeat pada sistem LSI 0,8 dengan *Autoflush*

Umpan : 1 Liter Alkalinitas : 439,64 ppm  
:  $\text{CaCl}_2 = 400 \text{ mg}$  pH : 7,9  
:  $\text{NaHCO}_3 = 605 \text{ mg}$  Temp : 29 C  
TDS : 566 ppm Waktu operasi : 6 jam  
 $\text{Ca}^{2+}$  : 144,14 ppm Tekanan : 5 kg/cm<sup>2</sup>  
**LSI : 0,8**

Pengamatan (jam)	Vol, (ml)	AF 15/5			AF 15/10			A	
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	(C
0,33	50	9,75	18,46	36,92	9,78	18,40	36,81	10,21	
0,67	50	9,73	18,50	37,00	9,77	18,42	36,85	10,03	
1,00	50	9,55	18,85	37,70	9,68	18,60	37,19	9,59	
1,33	50	9,51	18,93	37,85	9,65	18,65	37,31	9,47	
1,67	50	9,58	18,79	37,58	9,54	18,87	37,74	9,32	
2,00	50	9,54	18,87	37,74	9,72	18,52	37,04	9,33	
2,33	50	9,54	18,87	37,74	9,63	18,69	37,38	9,32	

2,67	50	9,49	18,97	37,93	9,72	18,52	37,04	9,41
3,00	50	9,36	19,23	38,46	9,58	18,79	37,58	9,49
3,33	50	9,45	19,05	38,10	9,54	18,87	37,74	9,52
3,67	50	9,59	18,77	37,54	9,42	19,11	38,22	9,57
4,00	50	9,51	18,93	37,85	9,42	19,11	38,22	9,68
4,33	50	9,58	18,79	37,58	9,55	18,85	37,70	9,72
4,67	50	9,57	18,81	37,62	9,63	18,69	37,38	9,43
5,00	50	9,54	18,87	37,74	9,59	18,77	37,54	9,42
5,33	50	9,49	18,97	37,93	9,47	19,01	38,01	9,5
5,67	50	9,45	19,05	38,10	9,48	18,99	37,97	9,49
6,00	50	9,48	18,99	37,97	9,63	18,69	37,38	9,47

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	AF 15/25			AF 15/30			W (detik)
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	
0,33	50	9,62	18,71	37,42	10,45	17,22	34,45	10,45
0,67	50	9,64	18,67	37,34	10,36	17,37	34,75	10,36
1,00	50	9,54	18,87	37,74	10,31	17,46	34,92	10,31
1,33	50	9,28	19,40	38,79	10,37	17,36	34,72	10,37
1,67	50	9,46	19,03	38,05	10,29	17,49	34,99	10,29
2,00	50	9,37	19,21	38,42	10,17	17,70	35,40	10,17
2,33	50	9,23	19,50	39,00	10,15	17,73	35,47	10,15
2,67	50	9,49	18,97	37,93	10,21	17,63	35,26	10,21
3,00	50	9,57	18,81	37,62	10,21	17,63	35,26	10,21
3,33	50	9,64	18,67	37,34	10,26	17,54	35,09	10,26
3,67	50	9,6	18,75	37,50	10,22	17,61	35,23	10,22
4,00	50	9,41	19,13	38,26	10,53	17,09	34,19	10,53
4,33	50	9,35	19,25	38,50	10,48	17,18	34,35	10,48
4,67	50	9,42	19,11	38,22	10,63	16,93	33,87	10,63
5,00	50	9,25	19,46	38,92	10,59	17,00	33,99	10,59
5,33	50	9,53	18,89	37,78	10,53	17,09	34,19	10,53
5,67	50	9,27	19,42	38,83	10,57	17,03	34,06	10,57
6,00	50	9,44	19,07	38,14	10,55	17,06	34,12	10,55

Pengamatan (jam)	Vol, (ml)	30/5			30/10				
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	(l
0,33	50	9,86	18,26	36,51	9,77	18,42	36,85	10,27	
0,67	50	9,77	18,42	36,85	9,65	18,65	37,31	9,78	
1,00	50	9,63	18,69	37,38	9,66	18,63	37,27	10,05	
1,33	50	9,45	19,05	38,10	9,59	18,77	37,54	9,56	
1,67	50	9,55	18,85	37,70	9,49	18,97	37,93	9,45	
2,00	50	9,49	18,97	37,93	9,68	18,60	37,19	9,32	
2,33	50	9,47	19,01	38,01	9,65	18,65	37,31	9,39	
2,67	50	9,53	18,89	37,78	9,56	18,83	37,66	9,44	
3,00	50	9,33	19,29	38,59	9,49	18,97	37,93	9,53	
3,33	50	9,49	18,97	37,93	9,55	18,85	37,70	9,55	
3,67	50	9,55	18,85	37,70	9,44	19,07	38,14	9,45	
4,00	50	9,51	18,93	37,85	9,66	18,63	37,27	9,54	
4,33	50	9,58	18,79	37,58	9,46	19,03	38,05	9,67	
4,67	50	9,57	18,81	37,62	9,61	18,73	37,46	9,39	
5,00	50	9,46	19,03	38,05	9,57	18,81	37,62	9,4	
5,33	50	9,55	18,85	37,70	9,41	19,13	38,26	9,45	
5,67	50	9,51	18,93	37,85	9,49	18,97	37,93	9,43	
6,00	50	9,44	19,07	38,14	9,5	18,95	37,89	9,43	

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	30/25			30/30			W (d
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	
0,33	50	9,67	18,61	37,23	10,43	17,26	34,52	10
0,67	50	9,65	18,65	37,31	10,39	17,32	34,65	10
1,00	50	9,48	18,99	37,97	10,45	17,22	34,45	10



1,33	50	9,29	19,38	38,75	10,54	17,08	34,16	10
1,67	50	9,49	18,97	37,93	10,39	17,32	34,65	10
2,00	50	9,33	19,29	38,59	10,23	17,60	35,19	10
2,33	50	9,28	19,40	38,79	10,38	17,34	34,68	10
2,67	50	9,51	18,93	37,85	10,22	17,61	35,23	10
3,00	50	9,55	18,85	37,70	10,16	17,72	35,43	10
3,33	50	9,64	18,67	37,34	10,17	17,70	35,40	10
3,67	50	9,71	18,54	37,08	10,23	17,60	35,19	10
4,00	50	9,44	19,07	38,14	10,45	17,22	34,45	10
4,33	50	9,41	19,13	38,26	10,44	17,24	34,48	10
4,67	50	9,39	19,17	38,34	10,59	17,00	33,99	10
5,00	50	9,38	19,19	38,38	10,61	16,97	33,93	10
5,33	50	9,51	18,93	37,85	10,5	17,14	34,29	10
5,67	50	9,25	19,46	38,92	10,52	17,11	34,22	10
6,00	50	9,45	19,05	38,10	10,65	16,90	33,80	10

Pengamatan (jam)	Vol, (ml)	AF 60/5			AF 60/10			AF	
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	L (L)
0,33	50	9,98	18,04	36,07	9,43	19,09	38,18	10,34	1
0,67	50	9,69	18,58	37,15	9,44	19,07	38,14	10,31	1
1,00	50	9,65	18,65	37,31	9,32	19,31	38,63	9,67	1
1,33	50	9,52	18,91	37,82	9,78	18,40	36,81	9,54	1
1,67	50	9,49	18,97	37,93	9,49	18,97	37,93	9,23	1
2,00	50	9,64	18,67	37,34	9,46	19,03	38,05	9,54	1
2,33	50	9,44	19,07	38,14	9,56	18,83	37,66	9,65	1
2,67	50	9,51	18,93	37,85	9,66	18,63	37,27	9,39	1
3,00	50	9,32	19,31	38,63	9,48	18,99	37,97	9,51	1
3,33	50	9,38	19,19	38,38	9,65	18,65	37,31	9,23	1
3,67	50	9,55	18,85	37,70	9,37	19,21	38,42	9,88	1
4,00	50	9,41	19,13	38,26	9,42	19,11	38,22	9,56	1

4,33	50	9,61	18,73	37,46	9,54	18,87	37,74	9,68	1
4,67	50	9,67	18,61	37,23	9,49	18,97	37,93	9,51	1
5,00	50	9,36	19,23	38,46	9,55	18,85	37,70	9,39	1
5,33	50	9,47	19,01	38,01	9,42	19,11	38,22	9,33	1
5,67	50	9,44	19,07	38,14	9,45	19,05	38,10	9,56	1
6,00	50	9,52	18,91	37,82	9,51	18,93	37,85	9,36	1

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	AF 60/25			AF 60/30			W (d
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	
0,33	50	9,73	18,50	37,00	10,63	16,93	33,87	10
0,67	50	9,77	18,42	36,85	10,66	16,89	33,77	10
1,00	50	9,47	19,01	38,01	10,83	16,62	33,24	10
1,33	50	9,22	19,52	39,05	10,64	16,92	33,83	10
1,67	50	9,51	18,93	37,85	10,32	17,44	34,88	10
2,00	50	9,48	18,99	37,97	10,25	17,56	35,12	10
2,33	50	9,22	19,52	39,05	10,07	17,87	35,75	10
2,67	50	9,39	19,17	38,34	10,22	17,61	35,23	10
3,00	50	9,37	19,21	38,42	10,43	17,26	34,52	10
3,33	50	9,34	19,27	38,54	10,45	17,22	34,45	10
3,67	50	9,52	18,91	37,82	10,56	17,05	34,09	10
4,00	50	9,48	18,99	37,97	10,55	17,06	34,12	10
4,33	50	9,44	19,07	38,14	10,83	16,62	33,24	10
4,67	50	9,37	19,21	38,42	10,66	16,89	33,77	10
5,00	50	9,21	19,54	39,09	10,62	16,95	33,90	10
5,33	50	9,43	19,09	38,18	10,51	17,13	34,25	10
5,67	50	9,22	19,52	39,05	10,76	16,73	33,46	10
6,00	50	9,42	19,11	38,22	10,88	16,54	33,09	10

### 10. Fluks Permeat pada sistem LSI 1,2 dengan *Autoflush*

Umpan	: 1 Liter	Alkalinitas	: 659,46 ppm
	: $\text{CaCl}_2 = 600 \text{ mg}$	pH	: 7,9
	: $\text{NaHCO}_3 = 905,1 \text{ mg}$	Temp	: $30^\circ\text{C}$
TDS	: 893 ppm	Waktu operasi	: 6 jam
$\text{Ca}^{2+}$	: 216,22 ppm	Tekanan	: $5 \text{ kg/cm}^2$
		LSI	: 1,2

Pengamatan (jam)	Vol (ml)	AF 15/5			AF 15/10			A	
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam $\text{m}^2$ )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam $\text{m}^2$ )	Waktu (detik)	(l)
0,33	50	9,83	18,31	36,62	9,97	18,05	36,11	9,65	
0,67	50	9,75	18,46	36,92	9,83	18,31	36,62	9,51	
1,00	50	9,71	18,54	37,08	9,79	18,39	36,77	9,26	
1,33	50	9,67	18,61	37,23	9,8	18,37	36,73	9,34	
1,67	50	9,69	18,58	37,15	9,58	18,79	37,58	9,54	
2,00	50	9,55	18,85	37,70	9,72	18,52	37,04	9,33	
2,33	50	9,56	18,83	37,66	9,64	18,67	37,34	9,32	
2,67	50	9,48	18,99	37,97	9,57	18,81	37,62	10,17	
3,00	50	9,52	18,91	37,82	9,56	18,83	37,66	9,49	
3,33	50	9,64	18,67	37,34	9,53	18,89	37,78	9,42	
3,67	50	9,72	18,52	37,04	9,4	19,15	38,30	9,33	
4,00	50	9,75	18,46	36,92	9,42	19,11	38,22	9,41	
4,33	50	9,59	18,77	37,54	9,5	18,95	37,89	9,39	
4,67	50	9,56	18,83	37,66	9,49	18,97	37,93	9,47	
5,00	50	9,62	18,71	37,42	9,56	18,83	37,66	9,52	
5,33	50	9,5	18,95	37,89	9,47	19,01	38,01	9,44	
5,67	50	9,53	18,89	37,78	9,48	18,99	37,97	9,49	
6,00	50	9,49	18,97	37,93	9,61	18,73	37,46	9,28	

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	AF 15/25			AF 15/30			W (d)
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam $\text{m}^2$ )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam $\text{m}^2$ )	

0,33	50	9,56	18,83	37,66	10,93	16,47	32,94	10
0,67	50	9,48	18,99	37,97	10,78	16,70	33,40	10
1,00	50	9,34	19,27	38,54	10,84	16,61	33,21	10
1,33	50	9,33	19,29	38,59	10,55	17,06	34,12	10
1,67	50	9,92	18,15	36,29	10,67	16,87	33,74	10
2,00	50	9,96	18,07	36,14	10,55	17,06	34,12	10
2,33	50	9,78	18,40	36,81	10,71	16,81	33,61	10
2,67	50	9,66	18,63	37,27	10,01	17,98	35,96	10
3,00	50	9,31	19,33	38,67	10,05	17,91	35,82	10
3,33	50	9,45	19,05	38,10	10,17	17,70	35,40	10
3,67	50	9,52	18,91	37,82	10,18	17,68	35,36	10
4,00	50	9,29	19,38	38,75	10,78	16,70	33,40	10
4,33	50	9,28	19,40	38,79	10,93	16,47	32,94	10
4,67	50	9,5	18,95	37,89	10,81	16,65	33,30	10
5,00	50	9,64	18,67	37,34	10,88	16,54	33,09	10
5,33	50	9,65	18,65	37,31	10,98	16,39	32,79	10
5,67	50	9,62	18,71	37,42	10,94	16,45	32,91	10
6,00	50	9,55	18,85	37,70	10,67	16,87	33,74	10

Pengamatan (jam)	Vol, (ml)	AF 30/5			AF 30/10			A	
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	(l)
0,33	50	9,88	18,22	36,44	10,32	17,44	34,88	9,64	
0,67	50	9,71	18,54	37,08	9,93	18,13	36,25	9,75	
1,00	50	9,73	18,50	37,00	9,62	18,71	37,42	9,54	
1,33	50	9,66	18,63	37,27	9,56	18,83	37,66	9,33	
1,67	50	9,73	18,50	37,00	9,84	18,29	36,59	9,65	
2,00	50	9,5	18,95	37,89	9,77	18,42	36,85	9,23	
2,33	50	9,54	18,87	37,74	9,53	18,89	37,78	9,38	
2,67	50	9,44	19,07	38,14	9,61	18,73	37,46	10,07	
3,00	50	9,35	19,25	38,50	9,55	18,85	37,70	9,56	

3,33	50	9,66	18,63	37,27	9,45	19,05	38,10	9,43
3,67	50	9,75	18,46	36,92	9,48	18,99	37,97	9,31
4,00	50	9,67	18,61	37,23	9,41	19,13	38,26	9,44
4,33	50	9,55	18,85	37,70	9,55	18,85	37,70	9,41
4,67	50	9,48	18,99	37,97	9,47	19,01	38,01	9,49
5,00	50	9,49	18,97	37,93	9,59	18,77	37,54	9,55
5,33	50	9,38	19,19	38,38	9,44	19,07	38,14	9,42
5,67	50	9,59	18,77	37,54	9,48	18,99	37,97	9,5
6,00	50	9,5	18,95	37,89	9,58	18,79	37,58	9,25

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	AF 30/25			AF 30/30			W (d)
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	
0,33	50	9,55	18,85	37,70	10,99	16,38	32,76	10
0,67	50	9,43	19,09	38,18	10,77	16,71	33,43	10
1,00	50	9,33	19,29	38,59	10,91	16,50	33,00	10
1,33	50	9,35	19,25	38,50	10,45	17,22	34,45	10
1,67	50	9,98	18,04	36,07	10,73	16,78	33,55	10
2,00	50	9,99	18,02	36,04	10,65	16,90	33,80	10
2,33	50	9,56	18,83	37,66	10,78	16,70	33,40	10
2,67	50	9,65	18,65	37,31	10,14	17,75	35,50	10
3,00	50	9,29	19,38	38,75	10,92	16,48	32,97	10
3,33	50	9,44	19,07	38,14	10,95	16,44	32,88	10
3,67	50	9,55	18,85	37,70	10,76	16,73	33,46	10
4,00	50	9,25	19,46	38,92	10,65	16,90	33,80	10
4,33	50	9,21	19,54	39,09	10,95	16,44	32,88	10
4,67	50	9,52	18,91	37,82	10,93	16,47	32,94	10
5,00	50	9,65	18,65	37,31	10,83	16,62	33,24	10
5,33	50	9,67	18,61	37,23	10,95	16,44	32,88	10
5,67	50	9,63	18,69	37,38	10,97	16,41	32,82	10
6,00	50	9,53	18,89	37,78	10,86	16,57	33,15	10

Pengamatan (jam)	Vol, (ml)	AF 60/5			AF 60/10			AF 6	
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	La Al (L/jam)
0,33	50	9,81	18,35	36,70	10,35	17,39	34,78	9,89	18,
0,67	50	9,75	18,46	36,92	9,9	18,18	36,36	9,75	18,
1,00	50	9,77	18,42	36,85	9,61	18,73	37,46	9,67	18,
1,33	50	9,69	18,58	37,15	9,55	18,85	37,70	9,45	19,
1,67	50	9,66	18,63	37,27	9,81	18,35	36,70	9,58	18,
2,00	50	9,59	18,77	37,54	9,78	18,40	36,81	9,31	19,
2,33	50	9,57	18,81	37,62	9,49	18,97	37,93	9,27	19,
2,67	50	9,42	19,11	38,22	9,66	18,63	37,27	10,01	17,
3,00	50	9,48	18,99	37,97	9,5	18,95	37,89	9,55	18,
3,33	50	9,62	18,71	37,42	9,43	19,09	38,18	9,52	18,
3,67	50	9,7	18,56	37,11	9,52	18,91	37,82	9,32	19,
4,00	50	9,62	18,71	37,42	9,44	19,07	38,14	9,45	19,
4,33	50	9,59	18,77	37,54	9,59	18,77	37,54	9,51	18,
4,67	50	9,45	19,05	38,10	9,44	19,07	38,14	9,56	18,
5,00	50	9,39	19,17	38,34	9,55	18,85	37,70	9,35	19,
5,33	50	9,42	19,11	38,22	9,41	19,13	38,26	9,67	18,
5,67	50	9,62	18,71	37,42	9,51	18,93	37,85	9,87	18,
6,00	50	9,51	18,93	37,85	9,62	18,71	37,42	9,56	18,

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	AF 60/25			AF 60/30			W (d)
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	
0,33	50	9,65	18,65	37,31	10,93	16,47	32,94	10
0,67	50	9,34	19,27	38,54	10,73	16,78	33,55	10
1,00	50	9,39	19,17	38,34	10,95	16,44	32,88	10
1,33	50	9,33	19,29	38,59	10,55	17,06	34,12	10
1,67	50	9,85	18,27	36,55	10,67	16,87	33,74	10
2,00	50	9,69	18,58	37,15	10,62	16,95	33,90	10
2,33	50	9,58	18,79	37,58	10,87	16,56	33,12	10
2,67	50	9,66	18,63	37,27	10,26	17,54	35,09	10
3,00	50	9,27	19,42	38,83	10,76	16,73	33,46	10
3,33	50	9,34	19,27	38,54	10,99	16,38	32,76	1
3,67	50	9,59	18,77	37,54	10,73	16,78	33,55	10
4,00	50	9,22	19,52	39,05	10,53	17,09	34,19	1
4,33	50	9,46	19,03	38,05	10,97	16,41	32,82	1
4,67	50	9,48	18,99	37,97	10,86	16,57	33,15	1
5,00	50	9,66	18,63	37,27	10,88	16,54	33,09	1
5,33	50	9,58	18,79	37,58	10,84	16,61	33,21	1
5,67	50	9,61	18,73	37,46	10,91	16,50	33,00	1
6,00	50	9,49	18,97	37,93	10,85	16,59	33,18	1

#### 11. Fluks Permeat pada sistem LSI 1,5 dengan *Autoflush*

Umpan : 1 Liter Alkalinitas : 879,28 ppm  
 : CaCl<sub>2</sub> = 800 mg pH : 7,7  
 : NaHCO<sub>3</sub> = 1210 mg Temp : 30°C  
 TDS : 1290 ppm Waktu operasi : 6 jam  
 Ca<sup>2+</sup> : 288,29 ppm Tekanan : 5 kg/cm<sup>2</sup>  
 LSI : 1,5

Pengamatan	Vol,	15/5	15/10	
------------	------	------	-------	--

(jam)	(ml)	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	(d
0,33	50	11,02	16,33	32,67	12,09	14,89	29,78	11,87	
0,67	50	10,27	17,53	35,05	10,45	17,22	34,45	11,34	
1,00	50	10,22	17,61	35,23	10,49	17,16	34,32	10,98	
1,33	50	10,19	17,66	35,33	10,38	17,34	34,68	10,78	
1,67	50	10,11	17,80	35,61	10,33	17,42	34,85	10,52	
2,00	50	10,14	17,75	35,50	10,33	17,42	34,85	10,55	
2,33	50	10,14	17,75	35,50	10,38	17,34	34,68	10,53	
2,67	50	10,09	17,84	35,68	10,64	16,92	33,83	10,39	
3,00	50	10,05	17,91	35,82	10,59	17,00	33,99	10,43	
3,33	50	10,08	17,86	35,71	10,3	17,48	34,95	10,06	
3,67	50	10,08	17,86	35,71	10,21	17,63	35,26	10,42	
4,00	50	9,86	18,26	36,51	10,2	17,65	35,29	10,12	
4,33	50	9,95	18,09	36,18	10,11	17,80	35,61	10,05	
4,67	50	9,83	18,31	36,62	10,06	17,89	35,79	10,03	
5,00	50	10,01	17,98	35,96	10,06	17,89	35,79	10,07	
5,33	50	9,98	18,04	36,07	10,17	17,70	35,40	10,15	
5,67	50	10,05	17,91	35,82	10,24	17,58	35,16	10,05	
6,00	50	9,88	18,22	36,44	10,31	17,46	34,92	10,09	

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	15/25			15/30			W (d
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	
0,33	50	11,53	15,61	31,22	11,97	15,04	30,08	11
0,67	50	11,55	15,58	31,17	11,86	15,18	30,35	11
1,00	50	11,45	15,72	31,44	11,61	15,50	31,01	11
1,33	50	11,27	15,97	31,94	11,35	15,86	31,72	11
1,67	50	10,98	16,39	32,79	11,31	15,92	31,83	11
2,00	50	10,91	16,50	33,00	11,09	16,23	32,46	11
2,33	50	10,99	16,38	32,76	11,45	15,72	31,44	11
2,67	50	11,05	16,29	32,58	11,26	15,99	31,97	11
3,00	50	11,21	16,06	32,11	11,46	15,71	31,41	11
3,33	50	11,23	16,03	32,06	11,38	15,82	31,63	11
3,67	50	11,03	16,32	32,64	11,24	16,01	32,03	11
4,00	50	11,37	15,83	31,66	11,24	16,01	32,03	11
4,33	50	10,98	16,39	32,79	11,29	15,94	31,89	11
4,67	50	10,91	16,50	33,00	11,29	15,94	31,89	11



5,00	50	11,04	16,30	32,61	11,23	16,03	32,06	11,04
5,33	50	11,63	15,48	30,95	11,15	16,14	32,29	11,63
5,67	50	11,65	15,45	30,90	11,28	15,96	31,91	11,65
6,00	50	11,88	15,15	30,30	11,3	15,93	31,86	11,88

Pengamatan (jam)	Vol, (ml)	AF 30/5			AF 30/10			Waktu (detik)	
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )		
0,33	50	11,05	16,29	32,58	12,1	14,88	29,75	11,89	
0,67	50	10,35	17,39	34,78	10,43	17,26	34,52	11,3	
1,00	50	10,23	17,60	35,19	10,45	17,22	34,45	10,93	
1,33	50	10,17	17,70	35,40	10,34	17,41	34,82	10,87	
1,67	50	10,15	17,73	35,47	10,31	17,46	34,92	10,53	
2,00	50	10,13	17,77	35,54	10,29	17,49	34,99	10,51	
2,33	50	10,14	17,75	35,50	10,4	17,31	34,62	10,49	
2,67	50	10,07	17,87	35,75	10,56	17,05	34,09	10,38	
3,00	50	10,03	17,95	35,89	10,49	17,16	34,32	10,48	
3,33	50	10,06	17,89	35,79	10,27	17,53	35,05	10,01	
3,67	50	10,09	17,84	35,68	10,19	17,66	35,33	10,35	
4,00	50	9,87	18,24	36,47	10,2	17,65	35,29	10,07	
4,33	50	9,91	18,16	36,33	10,12	17,79	35,57	10,05	
4,67	50	9,82	18,33	36,66	10,02	17,96	35,93	10,01	
5,00	50	10,03	17,95	35,89	10,01	17,98	35,96	10,09	
5,33	50	9,95	18,09	36,18	10,14	17,75	35,50	10,13	
5,67	50	10,03	17,95	35,89	10,22	17,61	35,23	10,09	
6,00	50	9,86	18,26	36,51	10,29	17,49	34,99	10,03	

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	AF 30/25			AF 30/30			W (detik)
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	
0,33	50	11,56	15,57	31,14	11,95	15,06	30,13	11,95
0,67	50	11,67	15,42	30,85	11,8	15,25	30,51	11,8
1,00	50	11,41	15,78	31,55	11,75	15,32	30,64	11,75
1,33	50	11,23	16,03	32,06	11,39	15,80	31,61	11,39
1,67	50	10,92	16,48	32,97	11,35	15,86	31,72	11,35
2,00	50	10,87	16,56	33,12	11,06	16,27	32,55	11,06
2,33	50	10,95	16,44	32,88	11,43	15,75	31,50	11,43
2,67	50	11,08	16,25	32,49	11,22	16,04	32,09	11,22
3,00	50	11,28	15,96	31,91	11,52	15,63	31,25	11,52
3,33	50	11,19	16,09	32,17	11,36	15,85	31,69	11,36
3,67	50	11,05	16,29	32,58	11,28	15,96	31,91	11,28
4,00	50	11,41	15,78	31,55	11,23	16,03	32,06	11,23
4,33	50	10,96	16,42	32,85	11,35	15,86	31,72	11,35
4,67	50	10,91	16,50	33,00	11,32	15,90	31,80	11,32
5,00	50	11,07	16,26	32,52	11,21	16,06	32,11	11,21
5,33	50	11,69	15,40	30,80	11,17	16,11	32,23	11,17
5,67	50	11,58	15,54	31,09	11,25	16,00	32,00	11,25
6,00	50	11,78	15,28	30,56	11,24	16,01	32,03	11,24

Pengamatan (jam)	Vol, (ml)	60/5			60/10			60/15	
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)
0,33	50	11,02	16,33	32,67	12,09	14,89	29,78	11,94	14,89

0,67	50	10,4	17,31	34,62	10,34	17,41	34,82	11,43	15
1,00	50	10,21	17,63	35,26	10,53	17,09	34,19	11,01	16
1,33	50	10,21	17,63	35,26	10,37	17,36	34,72	10,84	16
1,67	50	10,13	17,77	35,54	10,28	17,51	35,02	10,65	16
2,00	50	10,17	17,70	35,40	10,31	17,46	34,92	10,55	17
2,33	50	10,12	17,79	35,57	10,45	17,22	34,45	10,43	17
2,67	50	10,05	17,91	35,82	10,52	17,11	34,22	10,33	17
3,00	50	10,08	17,86	35,71	10,44	17,24	34,48	10,49	17
3,33	50	10,02	17,96	35,93	10,35	17,39	34,78	10,07	17
3,67	50	10,1	17,82	35,64	10,15	17,73	35,47	10,25	17
4,00	50	9,88	18,22	36,44	10,23	17,60	35,19	10,21	17
4,33	50	9,95	18,09	36,18	10,11	17,80	35,61	10,06	17
4,67	50	9,81	18,35	36,70	10,04	17,93	35,86	10,03	17
5,00	50	10,06	17,89	35,79	10,05	17,91	35,82	10,05	17
5,33	50	9,91	18,16	36,33	10,1	17,82	35,64	10,1	17
5,67	50	10,05	17,91	35,82	10,27	17,53	35,05	10,03	17
6,00	50	9,84	18,29	36,59	10,25	17,56	35,12	10,07	17

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	60/25			60/30			W (d
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	
0,33	50	11,65	15,45	30,90	11,98	15,03	30,05	12
0,67	50	11,56	15,57	31,14	11,83	15,22	30,43	12
1,00	50	11,44	15,73	31,47	11,71	15,37	30,74	12
1,33	50	11,28	15,96	31,91	11,43	15,75	31,50	12
1,67	50	11,02	16,33	32,67	11,32	15,90	31,80	12
2,00	50	10,79	16,68	33,36	11,05	16,29	32,58	12
2,33	50	10,89	16,53	33,06	11,53	15,61	31,22	12
2,67	50	11,02	16,33	32,67	11,19	16,09	32,17	12
3,00	50	11,23	16,03	32,06	11,54	15,60	31,20	12
3,33	50	11,16	16,13	32,26	11,33	15,89	31,77	12

3,67	50	11,08	16,25	32,49	11,27	15,97	31,94	11,27
4,00	50	11,47	15,69	31,39	11,21	16,06	32,11	11,21
4,33	50	10,99	16,38	32,76	11,3	15,93	31,86	11,3
4,67	50	10,86	16,57	33,15	11,34	15,87	31,75	11,34
5,00	50	11,02	16,33	32,67	11,26	15,99	31,97	11,26
5,33	50	11,66	15,44	30,87	11,27	15,97	31,94	11,27
5,67	50	11,54	15,60	31,20	11,22	16,04	32,09	11,22
6,00	50	11,55	15,58	31,17	11,19	16,09	32,17	11,19

## 12. Efektifitas Metode *Autoflush* Pada Sistem Membran Ro Selama 6 Hari

Umpan	: 1 Liter	Waktu operasi	: 6 jam
	: $\text{CaCl}_2 = 800 \text{ mg}$	Tekanan	: $5 \text{ kg/cm}^2$
	: $\text{NaHCO}_3 = 1210 \text{ mg}$	TDS permeat	: 29 ppm
TDS	: 1290 ppm	Temp	: $30^\circ\text{C}$
$\text{Ca}^{2+}$	: 288,29 ppm		
Alkalinitas	: 879,28 ppm	LSI	: 1,5
pH	: 7,7		

Pengamatan (jam)	Volume (ml)	1			2		
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m <sup>2</sup> )	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	
0,33	50	10,51	17,13	34,25	10,41	17,29	
0,67	50	10,5	17,14	34,29	10,18	17,68	
1,00	50	10,32	17,44	34,88	10,37	17,36	
1,33	50	10,13	17,77	35,54	10,27	17,53	
1,67	50	10,09	17,84	35,68	10,41	17,29	
2,00	50	10,48	17,18	34,35	10,56	17,05	
2,33	50	10,45	17,22	34,45	10,18	17,68	
2,67	50	10,42	17,27	34,55	10,19	17,66	
3,00	50	10,24	17,58	35,16	10,48	17,18	
3,33	50	10,15	17,73	35,47	10,28	17,51	
3,67	50	10,04	17,93	35,86	10,38	17,34	
4,00	50	10,01	17,98	35,96	10,51	17,13	
4,33	50	10,2	17,65	35,29	10,18	17,68	

4,67	50	10,1	17,82	35,64	10,04	17,93	
5,00	50	10,19	17,66	35,33	10,05	17,91	
5,33	50	10,28	17,51	35,02	10,24	17,58	
5,67	50	10,2	17,65	35,29	9,99	18,02	
6,00	50	10,53	17,09	34,19	10,06	17,89	
Pengamatan (jam)	Volume (ml)	4			5		
		Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m2)	Waktu (detik)	Laju Alir (L/jam)	Fluks (L/jam m2)
0,33	50	12,11	14,86	29,73	13,9	12,95	25,90
0,67	50	11,82	15,23	30,46	13,09	13,75	27,50
1,00	50	11,49	15,67	31,33	12,3	14,63	29,27
1,33	50	11,47	15,69	31,39	12,89	13,96	27,93
1,67	50	11,31	15,92	31,83	13,3	13,53	27,07
2,00	50	11,35	15,86	31,72	13,34	13,49	26,99
2,33	50	11,23	16,03	32,06	13,53	13,30	26,61
2,67	50	11,19	16,09	32,17	13,51	13,32	26,65
3,00	50	11,04	16,30	32,61	13,49	13,34	26,69
3,33	50	10,85	16,59	33,18	13,43	13,40	26,81
3,67	50	10,93	16,47	32,94	13,54	13,29	26,59
4,00	50	10,86	16,57	33,15	12,98	13,87	27,73
4,33	50	10,92	16,48	32,97	13,67	13,17	26,34
4,67	50	12,01	14,99	29,98	12,67	14,21	28,41
5,00	50	11,98	15,03	30,05	12,58	14,31	28,62
5,33	50	11,99	15,01	30,03	12,39	14,53	29,06
5,67	50	11,73	15,35	30,69	12,94	13,91	27,82
6,00	50	11,78	15,28	30,56	12,55	14,34	28,69